
WASSER ABFALL

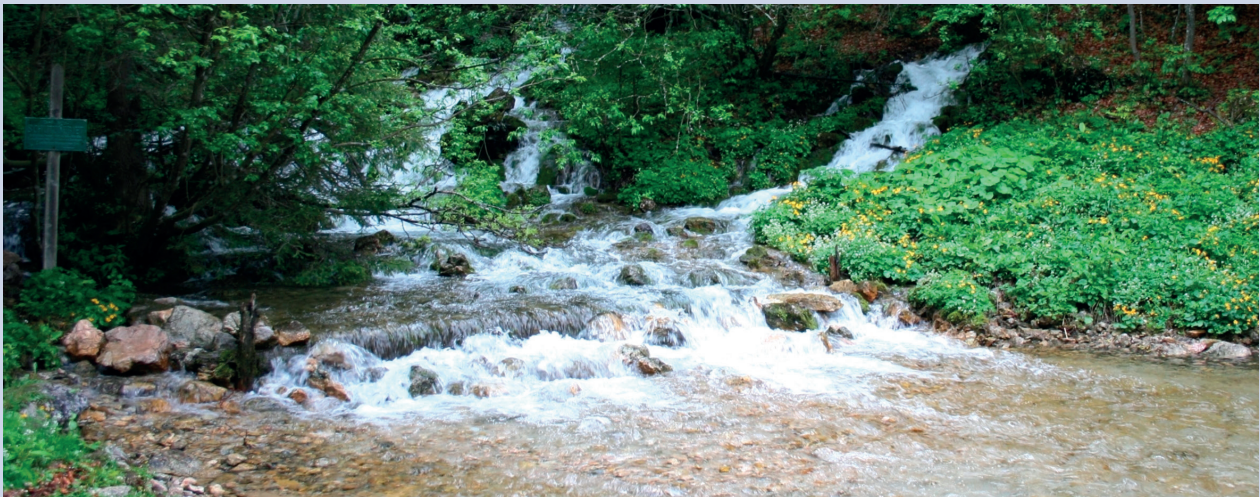
REGELWERK

■ REGELBLÄTTER

des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV)

ÖWAV-Regelblatt 220

Niederschlag-Abfluss-Modellierung



Wien 2019

In Kommission bei:
Austrian Standards plus GmbH
1020 Wien, Heinestraße 38

Dieses Regelblatt ist das Ergebnis ehrenamtlicher, technisch-wissenschaftlicher
Gemeinschaftsarbeit.

Dieses Regelblatt ist eine wichtige, jedoch nicht die einzige Erkenntnisquelle für eine fachgerechte Lösung. Durch seine Anwendung entzieht sich niemand der Verantwortung für eigenes Handeln oder für die richtige Anwendung im konkreten Fall. Eine etwaige Haftung der Urheber ist ausgeschlossen.

gedruckt mit freundlicher Unterstützung von



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Hinweis:

Bei allen Personenbezeichnungen in diesem Regelblatt gilt die gewählte Form für alle Geschlechter.

Impressum

Medieninhaber und Verleger: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien

Hersteller: druck.at Druck- und Handelsgesellschaft mbH, Leobersdorf

Es wird darauf hingewiesen, dass sämtliche Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Autoren oder des Verlages ausgeschlossen ist.

Dieses Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung, Verbreitung, und Übersetzung werden ausdrücklich vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne vorherige schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Redaktion, Satz und Layout: Mag. Fritz Randl (ÖWAV)

© 2019 by Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband.

WASSER  **ABFALL**

REGELWERK

■ REGELBLÄTTER

des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV)

ÖWAV-Regelblatt 220

Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Wien 2019

Geleitwort des ÖWAV-Präsidenten

Der Nutzungsdruck auf die weltweiten Wasserressourcen steigt auch infolge des Klimawandels stetig an, daher wird die nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource Wasser auch in Österreich immer wichtiger. Die Niederschlag-Abfluss-Modellierung kann eine Schlüsselrolle bei der Beantwortung wasserwirtschaftlicher Problemstellungen in diesem Zusammenhang spielen. Das ÖWAV-Regelblatt 220 gibt eine Hilfestellung für den Einsatz der hochkomplexen Niederschlag-Abfluss-Modelle in der wasserwirtschaftlichen Praxis.

Die Erstellung dieses Regelblatts erfolgte auf der neutralen und unabhängigen Plattform des ÖWAV, welche Expertinnen und Experten die Möglichkeit bietet, ihre gesammelten Erfahrungen praxisnah zusammenzuführen.

Gut Ding braucht bekanntlich Weile, und so ist es gelungen, in zehn Jahren ein umfangreiches und auf eine große Bandbreite von Anwendungen ausgelegtes Regelwerk zu erstellen, das über die Zusammenschau bereits vorhandener Inhalte weit hinausgeht und eine – bislang einzigartige – originäre Arbeit zum Thema Niederschlag-Abfluss-Modellierung darstellt.

Eine Excel-Checkliste, die an konkreten Beispielen entwickelt wurde und auf der ÖWAV-Homepage zum Gratisdownload zur Verfügung steht, unterstützt alle potenziellen Nutzergruppen – Auftraggeber, Sachverständige und andere AnwenderInnen – bei der praktischen Umsetzung.

Als Präsident des ÖWAV freut es mich besonders, dass das ÖWAV-Regelblatt 220, das bislang weitaus umfangreichste Regelwerk des ÖWAV, der Fachöffentlichkeit unentgeltlich zur Verfügung gestellt werden kann.

Ich darf mich im Namen des ÖWAV ganz herzlich bei Ausschussleiter Prof. Günter Blöschl, bei allen AusschussmitarbeiterInnen und den vortragenden Gästen sowie bei den beteiligten BereichsleiterInnen des ÖWAV – und nicht zuletzt der ÖWAV-Redaktion für Layout und Satz – ganz herzlich bedanken.

Besonderer Dank geht an die Technische Universität Wien, die die Drucklegung dieses Regelblatts ermöglicht hat.

Roland Hohenauer, Wien, im Juni 2019

Vorwort des Arbeitsausschusses

Die Niederschlag-Abfluss-Modellierung spielt eine Schlüsselrolle bei vielen wasserwirtschaftlichen Aufgabenstellungen, wie der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen oder der Bewirtschaftung knapper Wasserressourcen. Nur mit zuverlässigen Modellergebnissen kann eine sichere und ökonomische Planung bzw. Bewirtschaftung erfolgen. Allerdings erschwert die unübersichtliche Fülle von Modellen bzw. Softwarepaketen die Modellierung, ebenso wie das vielfältige Spektrum von Anwendungssituationen. Bislang fehlte eine Hilfestellung für Modellanwender, Auftraggeber, Sachverständige und Bereitsteller von Datengrundlagen für die spezifische österreichische Situation. Der Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband richtete deshalb im Dezember 2008 einen Ausschuss ein, mit dem Ziel, ein Regelblatt zu erstellen, das eine Hilfestellung bei der Arbeit mit Niederschlag-Abfluss-Modellen für wasserwirtschaftliche Aufgabenstellungen geben soll.

Wegen der Komplexität und des Umfangs der Thematik sowie der ehrenamtlichen Tätigkeit der Ausschussmitglieder verzögerte sich zwar die Fertigstellung des Regelblattes, nun kann es aber der Fachöffentlichkeit vorgelegt werden.

Die Ausschussmitglieder hoffen damit einen Beitrag zu einer effizienten, sicheren und zeitgemäßen Tätigkeit in diesem wichtigen Bereich der Wasserwirtschaft zu leisten.

Die Erstellung des Regelblattes wäre ohne den enormen Einsatz zahlreicher Expertinnen und Experten nicht möglich gewesen. Die Mitglieder des Ausschusses stellten ihre Kompetenzen und Zeit in mehr als 40 Sitzungen unentgeltlich zur Verfügung. Das offene und konstruktive Diskussionsklima ermöglichte es, ein gereiftes und in sich schlüssiges Werk entstehen zu lassen. Alle Nutzergruppen (Ingenieurbüros, Sachverständige, Auftraggeber und Universitäten) und unterschiedliche Forschungsbereiche waren im Ausschuss vertreten, wodurch eine große Bandbreite der Anwendungssituationen abgedeckt werden konnte. Fallweise anwesende Gäste erweiterten den Erfahrungsschatz der Gruppe.

Einige der Mitglieder fertigten Synthesebeispiele an, um die Anwendung des Regelblattes praktisch zu erläutern, sowie eine Checkliste zur Darstellung der Projektanforderungen für Auftragsvergaben vor Projektbeginn und zur Darstellung der Durchführung der Modellierung und der Qualität der Ergebnisse bei Projektende. Herr Martin Eder gestaltete die Checkliste.

Der ÖWAV stellte die Sitzungsräume und die Verpflegung bei den Sitzungen bereit, koordinierte die Arbeit insgesamt und erstellte die Layoutierung dieses Regelblattes. Die Technische Universität Wien übernahm die Druckkosten.

All diesen Beitragenden wird herzlichst für den überaus großen Einsatz und für die Ausdauer in den Jahren des Werdens dieses Regelblattes gedankt.

Günter Blöschl, Wien, im Juni 2019

An der Erstellung des ÖWAV-Regelblatts 220 haben mitgewirkt:

Leitung:

Univ.-Prof. DI Dr. Günter BLÖSCHL, Technische Universität Wien

Ausschussmitglieder:

Assoc. Prof. DI Dr. Stefan ACHLEITNER, Universität Innsbruck

DI Dr. Valentin GAMERITH, Hydroconsult GmbH, Graz

Univ.-Prof. DI Dr. Johannes HÜBL, Universität für Bodenkultur Wien

DI Günter HUMER, Dipl.-Ing. Günter Humer GmbH Ingenieurbüro für Kulturtechnik und Wasserwirtschaft, Geboltskirchen

Ass.-Prof. DI Dr. Robert KIRNBAUER (†), Technische Universität Wien

Assoc. Prof. DI Dr. Manfred KLEIDORFER, Universität Innsbruck

Mag. Dr. Bernhard KOHL, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Innsbruck

DI Christian KRAMMER, Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, St. Pölten

DI Johannes MOSER, Amt der Kärntner Landesregierung, Klagenfurt

DI Markus MOSER, Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Tamsweg

Dipl.-Hydrol. Dr. Gabriele MÜLLER, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien

Mag. Georg RAFFEINER, Amt der Tiroler Landesregierung, Innsbruck

DI Dr. Christian RESZLER, JR-AquaConSol GmbH, Graz

Dr. Johannes SCHÖBER, TIWAG Tiroler Wasserkraft AG, Innsbruck

DI Dr. Helmut SCHÖNLAUB, TIWAG Tiroler Wasserkraft AG, Innsbruck

DI Johannes WIESENEGGER, Amt der Salzburger Landesregierung, Salzburg

Gäste:

DI Dr. Martin FUCHS, Pöyry Austria GmbH, Wien

DI Ulrich HABERL, VERBUND Trading GmbH, Wien

DI Bianca KAHL, Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, St. Pölten

Rektor Univ.-Prof. DDI Dr. Dr. h.c. Harald KAINZ, Technische Universität Graz

Univ.-Prof. Dr. Ralf MERZ, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Halle (Saale)

Priv.-Doz. DI Dr. Florian RUDOLF-MIKLAU, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien

DI Dr. Johannes NEMMERT, Amt der Tiroler Landesregierung, Lienz

DI Andreas PICHLER, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien

DI Dr. Robert SCHATZL, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz

DI Gerald SCHÖLLER, Büro Dr. Lengyel ZT GmbH, Wien

Mag. Dr. Robert SPOLWIND, VERBUND Trading GmbH, Wien

DI Dr. Peter STRAUSS, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Petzenkirchen

für den ÖWAV:

Andreas GAUL, Bereichsleiter Wasserwirtschaft im ÖWAV, Wien

DI Elisabeth HABERFELLNER-VEIT, Referentin Wasserwirtschaft / Recht & Wirtschaft im ÖWAV, Wien

DI Werner MACHO, Bereichsleiter Wasserwirtschaft im ÖWAV, Wien

DI Wolfgang PAAL, MSc, Bereichsleiter Wasserwirtschaft im ÖWAV, Wien

Inhaltsverzeichnis

1.	Aufgabenstellung	11
1.1.	Niederschlag-Abfluss-Modellierung – ein Tool für das Flussgebietsmanagement.....	11
1.2.	Ziel und Gegenstand dieses Regelblattes	11
1.3.	Grundsätzlich empfohlene Vorgangsweise	14
1.4.	Verbindlichkeit des Regelblatts	16
2.	Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen	17
2.1.	Gebietsüberblick und Gebietseigenschaften	17
2.1.1.	Landschaftliche Einordnung	17
2.1.2.	Topografie, Gewässernetz, wasserwirtschaftliche Maßnahmen	17
2.1.3.	Geologie, Boden	18
2.1.4.	Vegetation, Landnutzung	20
2.1.5.	Kombinierte Informationen: Abflussdisposition, Abflussbeiwerte	21
2.2.	Niederschlag und andere meteorologische Größen	23
2.2.1.	Erhebung und Auswahl von Stationsdaten	23
2.2.2.	Datenprüfung und Korrektur	26
2.2.3.	Niederschlagsstatistik und Bemessungsniederschläge.....	31
2.2.4.	Zeitliche Verteilung des Ereignisniederschlags	34
2.2.5.	Räumliche Verteilung des Niederschlags	35
2.2.6.	Niederschlags-Prognosen und Klimawandel	44
2.3.	Abfluss	46
2.3.1.	Erhebung und Auswahl von Stationsdaten	46
2.3.2.	Datenprüfung und Korrektur	48
2.3.3.	Ereignisdokumentation	54
2.3.4.	Lokale und regionale Abflussstatistik.....	54
3.	Modellwahl (Modellkonzepte)	61
3.1.	Kriterien für die Modellwahl	61
3.2.	Modelltypen und raum-zeitliche Gliederung des Modells	62
3.2.1.	Kausalität und Modellkomplexität	62
3.2.2.	Räumliche Gliederung	64
3.2.3.	Zeitliche Gliederung.....	66
3.2.4.	Nachführungsalgorithmen	68
3.2.5.	Typische Diskretisierung nach Aufgabenstellungen	70
3.3.	Berechnungsansätze einzelner Prozesse in Niederschlag-Abfluss-Modellen	70
3.3.1.	Interzeption, Verdunstung und Schnee.....	70
3.3.2.	Abflussbildung	74
3.3.3.	Abflusskonzentration und Gerinnerouting.....	79
3.3.4.	Typische Berechnungsansätze nach Aufgabenstellungen.....	82
4.	Wahl der Modellparameterwerte	83
4.1.	Typen von Modellparametern und ihre Messbarkeit.....	83
4.2.	Vorgangsweise bei der Parameterwahl.....	86
4.2.1.	Zusatzinformation: Hard Data und Soft Data	86

4.2.2.	Städtische vs ländliche vs Wildbachgebiete	87
4.2.3.	Kalibrierungshierarchie und Konzept der dominanten Prozesse (DPC)	88
4.3.	A-priori-Parameter	90
4.3.1.	Prozessanalyse und Prozessverständnis – Begehungen.....	90
4.3.2.	Prozessanalyse anhand Abflussdaten und Grundwasserganglinien.....	93
4.3.3.	Parameter aus Gebietseigenschaften.....	95
4.4.	Parameterkalibrierung am Abfluss.....	98
4.4.1.	Vorgangsweise.....	98
4.4.2.	Beurteilung der Modellierungsgüte.....	100
4.4.3.	Manuelle Kalibrierung.....	104
4.4.4.	Automatische Kalibrierung.....	107
4.4.5.	Überparametrisierung.....	109
4.5.	Parameter für Gebiete ohne Abflussdaten.....	110
4.6.	Parameter für geänderte Bedingungen	115
4.6.1.	Parameter für geänderte Landnutzungsbedingungen	115
4.6.2.	Parameter für geänderte Klimabedingungen.....	118
5.	Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung	121
5.1.	Modellvalidierung an Abflussdaten	121
5.1.1.	Generelle Vorgangsweise Validierung/Plausibilisierung	121
5.1.2.	Schritte der Validierung.....	122
5.1.3.	Umgang mit schlechten Validierungsergebnissen	126
5.2.	Plausibilisierung von Modellen in unbeobachteten Einzugsgebieten	127
5.2.1.	Ländliche Einzugsgebiete.....	127
5.2.2.	Wildbacheinzugsgebiete.....	128
5.2.3.	Städtische Einzugsgebiete	130
5.3.	Spezielle Aspekte bei Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit (HQ_n)	132
5.3.1.	Grundsätzliche Vorgangsweise.....	132
5.3.2.	Wahl der Eingangsgrößen und deren Jährlichkeit.....	133
5.3.3.	Wahl der HQ_n -spezifischen Modellparameter	137
5.3.4.	HQ_n -spezifische regionale Einordnung der Niederschlag-Abfluss-Modellierung.....	145
5.4.	Modellanwendung auf Aufgabenstellung.....	148
6.	Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse	151
6.1.	Beurteilung der Unsicherheiten der Ergebnisse	151
6.1.1.	Typen von Unsicherheiten	151
6.1.2.	Abschätzung der Unsicherheiten.....	155
6.2.	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse.....	159
6.2.1.	Bewertung und Interpretation der Ergebnisse	159
6.2.2.	Bewertung der Qualität mittels Checkliste	159
6.3.	Berichtslegung an Auftraggeber	160
7.	Software und Daten	163
7.1.	Kriterien zur Softwareauswahl	163
7.2.	Kurzdarstellung gängiger Software.....	164
7.2.1.	Hydrologie.....	164

7.2.2.	Siedlungswasserwirtschaft	169
7.3.	Softwarevergleich	171
7.3.1.	Hydrologie.....	172
7.3.2.	Siedlungswasserwirtschaft	173
7.4.	Datenquellen in Österreich	174
7.4.1.	Hydro-meteorologische Daten	174
7.4.2.	Modell-Gebietsdaten (GIS).....	178
7.4.3.	Sonstige Informationsquellen	182
7.5.	Datenquellen im europäischen Raum bzw. Internet	182
8.	Synthesebeispiele zur praktischen Anwendung des Leitfadens mit Checklisten.....	183
	Synthesebeispiel Rumpelgraben	184
	1. Aufgabenstellung	184
	2. Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen	185
	3. Modellwahl (Modellkonzepte).....	202
	4. Wahl der Modellparameterwerte	210
	5. Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung	218
	6. Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse	230
	Synthesebeispiel Pram	251
	1. Aufgabenstellung	251
	2. Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen.....	252
	3. Modellwahl (Modellkonzepte).....	263
	4. Wahl der Modellparameterwerte	267
	5. Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung	275
	6. Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse	281
	Synthesebeispiel Weerbach.....	297
	1. Aufgabenstellung	297
	2. Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen.....	300
	3. Modellwahl	309
	4. Wahl der Modellparameterwerte	312
	5. Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung	317
	6. Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse	328
9.	Literatur	345
	ÖWAV-Regelwerk.....	361

1. Aufgabenstellung

1.1. Niederschlag-Abfluss-Modellierung – ein Tool für das Flussgebietsmanagement

Integriertes Flussgebietsmanagement umfasst die Ordnung der menschlichen Aktivitäten zur Nutzung des Wassers, zum Schutz des Wassers sowie zum Schutz vor den Gefahren des Wassers. Für sehr viele Aufgaben des Flussgebietsmanagements ist es notwendig, den Abfluss der Oberflächengewässer und deren Zubringer genau zu kennen. Bewirtschaftungsziele und Maßnahmenprogramme, wie sie im Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplan aufgestellt sind, durch die Wasserrahmenrichtlinie und Hochwasserrahmenrichtlinie vorgegeben sind, oder sich durch andere Tätigkeiten im Rahmen der wasserwirtschaftlichen Planung ergeben, erfordern eine Kenntnis des Abflusses.

Der Abfluss der Oberflächengewässer wird in Österreich durch ein umfangreiches Pegelnetz erhoben. Die damit gewonnenen Abflussdaten sind die Basis für die wasserwirtschaftlichen Planungen. Allerdings erfordern die meisten Aufgabenstellungen über die Messwerte hinausgehende Angaben des Abflusses:

- Angaben über extreme Abflussereignisse,
- Angaben über den Abfluss in der unmittelbaren Zukunft,
- Angaben über den Abfluss bei geänderten Bedingungen und
- Angaben über den Abfluss an Stellen, an denen keine Abflussdaten vorliegen.

Um diese Angaben zu erhalten, kann man mathematische Modelle heranziehen, die den Abfluss mittels des Niederschlags und anderer Informationen berechnen. Derartige Niederschlag-Abflussmodelle sind ein relativ komplexes Instrumentarium. Bei der Auswahl und Anwendung von Niederschlag-Abflussmodellen ist daher eine Reihe von Entscheidungen zu treffen, die sich nicht immer unmittelbar aus der aktuellen Situation ableiten lassen.

In der Literatur bzw. am Markt existiert eine große Vielfalt an Modellen bzw. Gleichungen. Teilweise ist dies auf die Vielfalt in den hydrologischen Prozessen zurückzuführen, teilweise auf unterschiedliche Anwendungssituationen oder historische Entwicklungen (Sivapalan und Blöschl, 2017). Bei der Anwendung von Niederschlag-Abflussmodellen treten Skalenprobleme auf, denn die Messdaten des Niederschlags liegen in der Regel als Punktwerte vor, während für die Modelle Flächenwerte über Einzugsgebiete erforderlich sind. Zusätzliche Skalenprobleme treten in der Modellierung selbst auf, da die Modellgleichungen und Modellparameter immer über bestimmte Flächenelemente angesetzt werden, die vereinfachend homogene Eigenschaften annehmen, während Einzugsgebiete tatsächlich sehr heterogen sind (Grayson and Blöschl 2000a). Deswegen werden Modellparameter, wenn möglich, an Abflussdaten kalibriert. Ist das nicht möglich, da am betreffenden Flussquerschnitt keine Abflussdaten vorliegen, müssen die Modellparameter aus anderen Informationsquellen rückgeschlossen werden. Schließlich gibt es auch zahlreiche Möglichkeiten, die Aussagekraft der Modellergebnisse zu beurteilen, die wiederum von vielen Faktoren abhängt.

Bislang gab es in Österreich keine einheitliche Vorgangsweise im Umgang mit Niederschlag-Abflussmodellen, und die Anwender oder Auftraggeber waren auf das im eigenen Bereich entwickelte Know-how angewiesen. Mit diesem Regelblatt liegt nun erstmals eine Unterlage vor, die die in Österreich vorliegenden Erfahrungen mit der Niederschlag-Abfluss-Modellierung zusammenträgt und in geschlossener Weise zur Verfügung stellt.

1.2. Ziel und Gegenstand dieses Regelblattes

Ziel dieses Regelblattes ist es, eine Hilfestellung bei der Arbeit mit Niederschlag-Abflussmodellen für wasserwirtschaftliche Aufgabenstellungen zu bieten. Insbesondere gibt das Regelblatt Empfehlungen in Hinblick auf die:

- Wahl von Eingangsgrößen,
- Wahl von Modellen/Software,
- Wahl von Modellparametern,
- Validierung und Anwendung von Modellen und
- Beurteilung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse.

Die Empfehlungen sind im Text jeweils durch eine **Box** markiert.

Das Regelblatt bezieht sich auf Niederschlag-Abflussmodelle in Einzugsgebieten sehr unterschiedlicher Größe, von Kleinstinzugsgebieten bis zu ganzen Flussgebieten. Auch die Zeitskalen umfassen eine große Spanne von Einzelereignissen bis hin zur Langzeitsimulation. Die Landschaften umfassen die in Österreich wichtigen Landschaftstypen. Insbesondere werden ländliche, alpine und städtische Landschaften unterschieden, und jeweils spezifische Empfehlungen gegeben.

Die betrachteten Prozesse sind die Bewegung des Niederschlagswassers im Boden und auf den Hängen, sowie der Ablauf des Wassers in den Gerinnen mit dem Ziel, den Abfluss in einem Querschnitt des Gerinnes zu berechnen. Schneespeicherung und Schneeschmelze werden ebenfalls betrachtet. Hingegen sind Gletscherschmelze und der Transport von Stoffen (gelöste Stoffe, Sediment) nicht Thema dieses Regelblattes, wenngleich die Abflussmodellierung eine Grundlage für diese Prozesse ist. Niederschlag-Abflussmodelle im Sinne des Regelblattes sind

- dynamisch (d. h. simulieren zeitabhängig den Abfluss in einem Gerinne) und
- basieren auf der Wasserbilanz (Niederschlag, Abfluss etc.).

Klimatologische Beziehungen (wie etwa die Budyko-Kurve für den langjährigen mittleren Abfluss), stochastische Zeitreihenmodelle (z. B. auf Basis von Autokorrelationen) und Regressionen sind nicht Thema dieses Regelblattes, da sie für wasserwirtschaftliche Fragestellungen heute eine untergeordnete Rolle spielen.

Das Regelblatt richtet sich an die folgenden Nutzergruppen in Österreich:

- Modellanwender, z. B. Ingenieurbüros,
- Institutionen, die Modellergebnisse beurteilen, z. B. Auftraggeber aus dem Bereich des öffentlichen Dienstes,
- Behörden und Sachverständige, die die Modellergebnisse im Zuge von Behördenverfahren für die Entscheidungsfindung heranziehen,
- Modellentwickler, z. B. Universitäten und andere Forschungsinstitutionen,
- Bereitsteller von Datengrundlagen.

Für die erste Nutzergruppe – Modellanwender – gibt das Regelblatt Empfehlungen für die verschiedenen hydrologischen Entscheidungen, die bei einem Modellierungsprojekt getroffen werden. Für die zweite Nutzergruppe – Institutionen, die Modellergebnisse beurteilen – gibt das Regelblatt konkrete Hinweise zur Einschätzung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Außerdem wird ein Protokoll zur transparenten Darstellung des Modellierungsvorganges empfohlen, das die Beurteilung erleichtern sollte. Für die dritte Nutzergruppe – Behörden und Sachverständige – erläutert das Regelblatt, auf welchen Grundlagen die Modelle beruhen und welche Aussagequalität deren Ergebnisse für ihre Fragestellungen haben. Für die vierte Gruppe – Modellentwickler – gibt dieses Regelblatt schließlich eine Zusammenstellung verschiedener Ansätze der Modellierung, Parameterbestimmung und Validierung und deren Anwendbarkeit für verschiedene Modellierungssituationen.

Die Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung dienen als Basis für die Entscheidungsfindung bei zahlreichen Aufgabenstellungen des Integrierten Flussgebietsmanagements (Tab. 1.1). Es wird betont, dass die Niederschlag-Abfluss-Modellierung die Basis für diese Entscheidungen liefert, jedoch nicht die Entscheidungen selbst vorwegnimmt. Dies ist in

Abb. 1.1 schematisch dargestellt. Beispielsweise für Fragen der Bemessung von Wasserbauten für den Fall von Hochwässern kann die Niederschlag-Abfluss-Modellierung die entsprechenden Abflussganglinien von Bemessungsereignissen liefern. Die Wahl der Bauwerksdimensionen hängt jedoch auch von zusätzlichen Überlegungen wie Sicherheitsbetrachtungen ab. Dementsprechend kann etwa die geplante Leistungsfähigkeit einer Hochwasserentlastung von den unmittelbaren Ergebnissen der Niederschlag-Abfluss-Modellierung abweichen, wenn es aus der Gesamtbetrachtung erforderlich ist. Ähnliches gilt für Fragen der Wasserbewirtschaftung und die Analyse von Veränderungen.

Tab. 1.1 Aufgabenstellungen der Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Aufgabenbereiche	Aufgabenstellungen
Hochwasserbemessung	Bemessung wasserwirtschaftlicher Anlagen und Schutzbauten: Hochwasserrückhaltebecken Hochwasserentlastungsanlagen Flussbauliche Anlagen (Begleitdämme, hydraulische Leistungsfähigkeit des Gerinnes) Brücken, Durchlässe Abwasserentsorgung (Mischwasserüberläufe, Kanalnetzdimensionierung)
Risikoanalyse	Abflüsse für Gefahrenzonenplanung: Abschätzung des Gefährdungspotenzials zufolge Hochwässern im Gerinne (fluviale Hochwässer), Hochwässer am Hang (pluviale Hochwässer) sowie Zuflusswellen für Dammbrechberechnungen Abschätzung des Restrisikos
Wasserbewirtschaftung	Wasserdargebotsabschätzung Wasserhaushalt, Gewässerschutz, Dotier- u. Restwasser Beschneigung, Trinkwasserversorgung, Grundwasserneubildung, Landwirtschaft Wasserhaushaltsmodellierung: Ermittlung aktueller und zu erwartender Werte sowie von Mittelwerten der Wasserhaushaltselemente und ihrer Komponenten Modelle für die Bewirtschaftung von Wasserressourcen: Speicherwirtschaft, Bereitstellung von Trink- und Brauchwasser für Industrie und Landwirtschaft
Abflussprognose	Hochwasserprognose für den Katastrophenschutz Niederwasserprognose für die Schifffahrt Energiewirtschaftliche Vorhersage
Analyse von Veränderungen	Auswirkungen wasserbaulicher Maßnahmen auf die Abflussverhältnisse Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf die Abflussverhältnisse Szenarien für Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt bzw. auf das Abflussregime
Grundlage für die Modellierung des Stofftransportes	Gemeinsame Modellierung von Wasser- und Stoffhaushalt bzw. -transport für verschiedene Anwendungszwecke (Wasserqualität, Gefährdung durch Schadstoffe, landwirtschaftliche Erträge etc.) Sediment Auslösekriterien für Murgänge
Prozessverständnis	Prozessverständnis Prozessstudium etc.

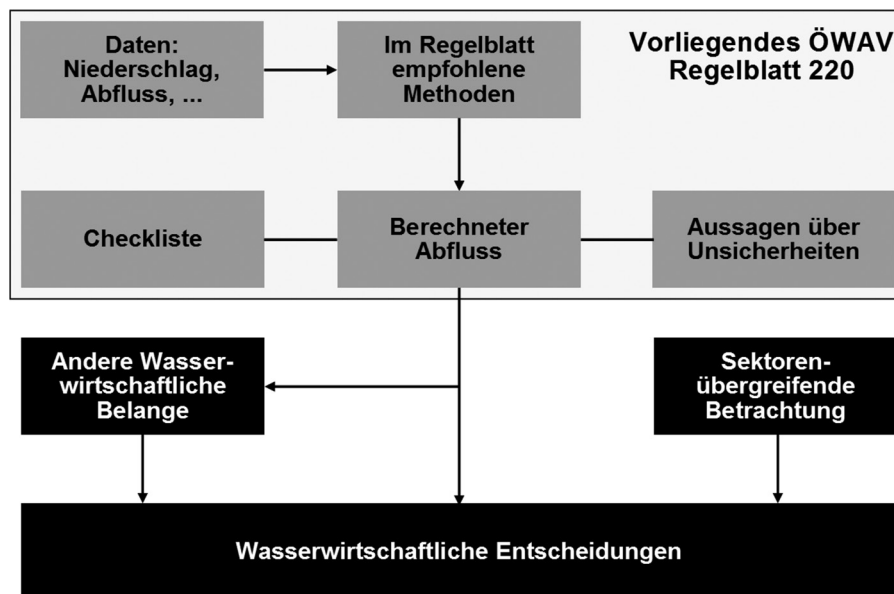


Abb. 1.1 Gegenstand des vorliegenden ÖWAV-Regelblatts 220

BOX 1.1: Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung der Niederschlag-Abfluss-Modellierung ist im Bericht zu dokumentieren.

1.3. Grundsätzlich empfohlene Vorgangsweise

Die grundsätzliche im Regelblatt empfohlene Vorgangsweise spiegelt sich in dessen Kapiteln wider:

Kapitel 2: Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen: So viel Information wie möglich heranziehen, Datenprüfung ist essenziell, nachvollziehen wie die Daten entstanden sind.

Kapitel 3: Modellwahl (Modellkonzepte): Modellwahl auf Basis von Aufgabenstellung, Datenlage, Prozesse, Erfahrung mit Modell, Modellgleichungen nachvollziehen. Komplexe Aufgabenstellungen, gute Datenlage, gute Modellierkenntnis zeigen in Richtung der Verwendung komplexer Modelle. Die Verantwortung für die Modellauswahl liegt beim Anwender.

Kapitel 4: Wahl der Modellparameterwerte: Womöglich aus Abflussdaten, Feldbegehungen für kleine und mittlere Gebiete, Portfolio von Informationen einschließlich Zusatzinformationen verwenden. Modellkalibrierung hierarchisch (dominant processes concept).

Kapitel 5: Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung: Split sample Validierung an Abflussdaten wenn möglich, ebenso Plausibilisierung an anderen Daten und unterschiedlichen Ansätzen. Für Hochwässer bestimmter Jährlichkeit: nicht alle Parameter extrem wählen, da sonst die Wahrscheinlichkeiten zu klein werden.

Kapitel 6: Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse: Analyse der Unsicherheiten der Ergebnisse, Bewertung der Ergebnisse im wasserwirtschaftlichen Kontext, umfangreiche Dokumentation der Arbeiten, Kommunikation der Unsicherheiten.

Kapitel 7: Software und Daten: Zusammenstellung der wichtigsten in Österreich verwendeten Modelle und ihrer Eigenschaften. Vorhandene hydro-meteorologische Daten und deren Bezugsquellen werden angeführt. Eine Übersicht von Gebietsdaten wie Grundkarten, Gelände-modellen, Bodendaten, Geologie oder Landnutzung.

Kapitel 8: Synthesebeispiele zur praktischen Anwendung des Regelblattes für drei Einzugsgebiete (Rumpelgraben in Salzburg, Pram in Oberösterreich, Weerbach in Tirol). Mit Checklisten.

Zur Unterstützung einer systematischen Bewertung der Qualität der Modellierung sind den Synthesebeispielen in Kapitel 8 ausgefüllte Checklisten beigelegt. Ein Leerformular der Checkliste ist von der Homepage des ÖWAV zur Verwendung herunterladbar. Die Checkliste dient

- zur Darstellung der Projektanforderungen für Auftragsvergaben vor Projektbeginn (Planung der Modellierung) sowie
- zur Darstellung der Durchführung der Modellierung und der Qualität der Ergebnisse bei Projektende (Abschlussprüfung).

Die Checkliste schließt mit einer übersichtlichen, zusammenfassenden Gesamtbewertung der Qualität der Niederschlag-Abfluss-Modellierung und des damit verbundenen Aufwandes.

Insgesamt ist die Niederschlag-Abfluss-Modellierung ein Zusammenspiel von:

- Aufgabenstellung und erwartetem Nutzen der Modellierung,
- Datenverfügbarkeit,
- relevanten hydrologischen Prozessen,
- praktischer Erfahrung der Bearbeiter mit der Modellierung.

Die Modellierung für eine bestimmte Fragestellung kann mit unterschiedlicher Intensität betrieben werden. Grundsätzlich lassen stärker ins Detail gehende Analysen, die mehr relevante Daten verwenden, genauere Aussage erwarten, allerdings ist der Aufwand größer. Auftraggeber sollten sich im Vorfeld überlegen, welche Aussagequalität durch das Modell erreicht werden soll. Ein auch im Detail belastbares Modell wird nur durch eine intensive Beschäftigung mit dem Modellgebiet in der Natur und im Modell entstehen. In diesem Zusammenhang ist der Ausgleich zwischen dem gewünschten Nutzen und den erforderlichen Kosten zu finden. Letztendlich bieten hochwertige Modelle mehr Zuverlässigkeit und Tragfähigkeit bei Entscheidungen im Flussgebietsmanagement. Genauere Ergebnisse sind nicht nur wissenschaftlicher Anspruch, sondern sie bieten auch gesellschaftlichen Nutzen, wenn Hochwasserschutzbauten auf die richtigen Abflüsse für den benötigten Schutzgrad ausgebaut werden (sparsamer Mitteleinsatz) oder der Bevölkerung ein ausreichender Schutz geboten werden kann.

In Anlehnung an den Eurocode 7 (EN, 2004) bei dem unterschiedliche geotechnische Kategorien unterschieden werden, weist dieses Regelblatt drei Hydrologische Kategorien (HK) wie folgt aus:

- HK 1: Wasserwirtschaftliche Fragestellungen mit geringem bis mittlerem Schadenspotenzial und einfachen hydrologischen Verhältnissen.
- HK 2: Wasserwirtschaftliche Fragestellungen mit mittlerem Schadenspotenzial und mittelkomplexen hydrologischen Verhältnissen.
- HK 3: Wasserwirtschaftliche Fragestellungen mit hohem Schadenspotenzial und komplexen hydrologischen Verhältnissen.

Generell sollten bei wichtigen, komplexen Fragen (HK 3) die Untersuchungen umfangreicher sein, entsprechend einem größeren Bearbeitungsaufwand und einer größeren Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Bei weniger wichtigen, einfachen Fragen (HK 1) können die Untersuchungen einfacher und kürzer ausfallen. Das bedeutet, dass bei HK 1 (und HK 2) nicht sämtliche Empfehlungen umgesetzt werden müssen, und der Schwerpunkt auf den Empfehlungen liegen kann, die im Regelblatt mit hoher Priorität ausgewiesen werden. Dieses Regelblatt gibt keine Vorgaben, welche Kategorie für eine konkrete Fragestellung zutrifft. Eine Einschätzung erfolgt, in Anlehnung an Eurocode 7, im Einzelfall durch die sachkundigen Projektverantwortlichen, gegebenenfalls in Abstimmung mit Auftraggeber und Auftragnehmer. Die Dimensionierung

einer Güterwegbrücke und Ufermauer für Einzelobjektschutz wäre typischerweise HK1, Zusammenspiel mehrerer Retentionsmaßnahmen und große Anlagen wären typischerweise HK3.

BOX 1.2: Festlegung der Hydrologischen Kategorie

Auf Basis der wasserwirtschaftlichen Fragestellung und des Schadenspotenzials muss von den sachkundigen Projektverantwortlichen, gegebenenfalls in Abstimmung mit Auftraggeber und Auftragnehmer, eine Hydrologische Kategorie festgelegt werden (HK1, HK2, HK3). Die Kategorie ist im Bericht zu dokumentieren.

1.4. Verbindlichkeit des Regelblatts

Das vorliegende Regelblatt ist eine Anleitung und damit nicht notwendigerweise für alle Niederschlag-Abfluss-Modellierungen in Österreich verbindlich. Wenn allerdings für ein bestimmtes Projekt (z. B. für eine Ausschreibung) dieses Regelblatt als Grundlage vereinbart wird, so ist eine Hierarchie der Verbindlichkeit durch die Wortwahl der Empfehlungen in den besonders gekennzeichneten Boxen vorgesehen:

(a) Wortwahl bei hoher Verbindlichkeit:

- Ist durchzuführen
- Ist notwendig
- Muss durchgeführt werden
- Ist unbedingt notwendig/erforderlich
- Ist notwendig/erforderlich

(b) Wortwahl bei mittlerer Verbindlichkeit:

- Es wird empfohlen
- Es wird jedenfalls empfohlen
- Es ist empfehlenswert
- Es ist zu empfehlen
- Es sollte durchgeführt werden
- Es sollte immer durchgeführt werden
- Es soll durchgeführt werden

(c) Wortwahl bei geringer Verbindlichkeit:

- Es ist sinnvoll ... durchzuführen
- Es kann durchgeführt werden
- Ist geeignet
- Kann sinnvoll sein
- Es ist günstig ... durchzuführen
- Ist hilfreich

Durch diese Unterscheidung soll für die Projektbeteiligten (insbesondere Auftraggeber und Auftragnehmer) die Erwartungslage – in Hinblick auf die Mindestanforderungen und erweiterte Anforderungen im Wechselspiel von Kosten und Nutzen – transparent gemacht werden. Dafür ist es erforderlich, dass die Datenlage frühzeitig bekannt ist.

2. Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen

2.1. Gebietsüberblick und Gebietseigenschaften

2.1.1. Landschaftliche Einordnung

Als Basis für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung ist es sinnvoll, die hydrologische und physiografische Situation des Einzugsgebiets und dessen Umgebung zu dokumentieren. Dazu zählen die Lage des Gebiets innerhalb der Region, die Einzugsgebietsfläche des betreffenden Gebiets und der Nachbargebiete sowie Besonderheiten des Gebiets (z. B. Überleitungen) im regionalen Kontext. Die landschaftliche Einordnung gibt eine erste Einschätzung des zu erwartenden Verhaltens des Niederschlag-Abfluss-Prozesses. Städtische Einzugsgebiete sind oft relativ klein, weisen einen hohen Versiegelungsgrad auf und das Kanalnetz spielt meist eine wichtige Rolle. Dadurch ist die Verzögerung zwischen Niederschlag und Abfluss relativ klein und der Anteil des Abflusses im Vergleich zum Niederschlag groß. Ländliche und gemischte Einzugsgebiete weisen demgegenüber oft eine größere Verzögerung des Abflusses und einen kleineren Abflussanteil auf (d. h. mehr Infiltration und Verdunstung). Wildbacheinzugsgebiete im steilen Gelände zeigen wiederum eine geringe Verzögerung des Abflusses. Es wird Geschiebe mobilisiert und Geschiebeablagerungen treten auch außerhalb des Gerinnes auf. Bei Wildbächen ist es wichtig, vorab die Leitprozesse zu unterscheiden. Gemäß ONR 24800 (Austrian Standards Institute 2014) werden die in Wildbacheinzugsgebieten vorkommenden Verlagerungsprozesse in folgende vier Gruppen von Leitprozessen unterteilt: Hochwasser, fluvialer Feststofftransport, murartiger Feststofftransport sowie Murgang.

Als Eingangsgrößen für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung sind Gebietseigenschaften für die Ableitung von Modellparametern erforderlich. Zudem sind Zeitreihen von Niederschlag und Lufttemperatur sowie im Einzelfall Daten zur Berechnung der Verdunstung und Schneeschmelze notwendig. Zur Kalibrierung und zur Validierung der Niederschlag-Abfluss-Modelle sind Abflusszeitreihen erforderlich. Welche Informationen im Detail benötigt werden, hängt von der Aufgabenstellung und vom Modell ab. Die restlichen Abschnitte des Kapitels 2. geben einen Überblick über die zu verwendenden Daten, ihre Prüfung, Aufbereitung und Interpretation. Kapitel 7. gibt Bezugsquellen dieser Daten in Österreich an.

BOX 2.1: Landschaftliche Einordnung

Es wird empfohlen, die landschaftliche, hydrologische und wasserwirtschaftliche Situation des Untersuchungsgebietes und der Region zu erheben und im Bericht zu dokumentieren. Für den Fall von Wildbacheinzugsgebieten ist auch eine Einstufung der Leitprozesse (Reinwasser, Geschiebe, Muren) vorzunehmen.

2.1.2. Topografie, Gewässernetz, wasserwirtschaftliche Maßnahmen

Digitale Geländemodelle sind die Basis für die meisten Niederschlag-Abfluss-Modelle. Sie liegen auf der Grundlage von Laserscanning für ganz Österreich flächendeckend in einer Auflösung von einem Meter und in Teilbereichen darunter vor. Bei den einzelnen Landesregierungen sind sie projektspezifisch teilweise frei erhältlich. Geländemodelle mit einer gröberen Auflösung wurden durch das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) auf Basis von Luftbildauswertungen erstellt und sind flächendeckend für Österreich vorhanden. Die Rasterweiten betragen zwischen 10 und 50 m. Für die hydraulische Modellierung des Wellenablaufes in Flussstrecken sind die hochaufgelösten Geländemodelle aus Laserscanning von Vorteil. Für die Berechnung der Abflussbildung und -konzentration sind jedoch die geringer aufgelösten Geländemodelle hinreichend genau. Aus den Geländemodellen kann eine Reihe von für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung relevanten Parametern abgeleitet werden, wie etwa die Höhenverteilung des Einzugsgebietes oder auch Hangneigung und Hangrichtung. Viele Abflussmodelle sind rasterbasiert. Dieses Raster kann direkt aus dem Geländemodell abgeleitet werden.

Einzugsgebietsgrenzen liegen in Österreich in unterschiedlichen Maßstäben vor. Hydrologisch konsistente Einzugsgebietsgrenzen sind beim BMNT projektspezifisch erhältlich. Die Flächenverzeichnisse der Flussgebiete in Österreich, herausgegeben vom BMNT, enthalten für jeden Gewässerabschnitt die zugehörige Einzugsgebietsfläche. Über das BMNT können die Daten einschließlich der Einzugsgebietsgrenzen in Form von ArcGIS-Shapes bezogen werden. Eine weitere Quelle zu den Einzugsgebietsgrenzen stellt der Hydrologische Atlas Österreichs dar (BMLFUW 2003, 2005, 2007). Die meisten Bundesländer besitzen ein eigenes GIS-System mit detaillierteren Einzugsgebietsgrenzen.

Für das Gewässernetz gilt Ähnliches wie für die Einzugsgebietsgrenzen. Ein Gewässernetz auf Basis der Karte ÖK 1:50 000 ist beim BEV kostenpflichtig erhältlich. Ein hydrologisch konsistent verknüpftes Gewässernetz ist der HORA-Datensatz (hora.gv.at) im Maßstab 1:500 000 sowie der Datensatz des Hydrologischen Atlas Österreichs. Das derzeit beste österreichweit verfügbare Gewässernetz ist das EU-Berichtsgewässernetz, das über das Inspire-Portal (www.inspire.gv.at) frei verfügbar ist.

Zur Berechnung des Wellenablaufes innerhalb von Einzugsgebieten ist die Geometrie der Gewässerprofile erforderlich. Diese werden vom Hydrographischen Dienst an allen Pegelstellen aufgenommen. Zusätzlich werden Gewässerprofile von den Flussbaulichen Abteilungen der Landesregierungen erhoben.

Angaben zu wasserwirtschaftlichen Maßnahmen, über künstliche Gewässer, Einleitungen und Entnahmen sowie über Speicher und Überleitungen in andere Flussgebiete sind über die Wasserwirtschaftlichen und/oder GIS-Abteilungen der Landesregierungen erhältlich.

2.1.3. Geologie, Boden

Je nach Zielmaßstab der Modellrechnungen stehen in der Geologischen Bundesanstalt geologische Karten in unterschiedlichen Maßstäben zur Verfügung (1:1,5 Mio, 1:500.000, 1:200.000, 1:75.000, 1:50.000, 1:25.000, 1:10.000). Neben den gedruckten Karten kann auf das zentrale Kartenwerk der Geologischen Karte 1:50.000 auch online zugegriffen werden (Webservices unter www.geologie.ac.at). Dieser Webservice betrifft sowohl die gedruckt aufgelegten Karten als auch die Karten aus dem Kartenwerk „Geofast“. Letztere sind kompilierte Kartenwerke, die unveröffentlichtes Material (ohne zusätzliche Geländekontrolle) zusammenfassen. Darüber hinaus sind alle Kartierungsoriginale der letzten Jahrzehnte – meist im Kartierungsmaßstab 1:10.000 – in der Bibliothek der Geologischen Bundesanstalt als Kopien erhältlich. Zusätzlich können die originalen Vektordaten zu allen Karten des Kartenwerkes 1:50.000 für die eigene Bearbeitung im GIS erworben werden (gebührenpflichtig).

Hydrogeologische Karten liegen in der Geologischen Bundesanstalt gedruckt nur in Übersichtsmaßstäben vor (gesamtes Bundesgebiet 1:1 Mio, 1:500.000, sowie Oberösterreich 1:200.000). Es gibt jedoch für viele Gebiete in Österreich hydrogeologische Detailstudien, die aus öffentlichen Mitteln finanziert wurden und damit frei zugänglich sind. Die wenigsten davon wurden jedoch publiziert. Eine Literaturrecherche über den Online Katalog der Geologischen Bundesanstalt (www.geologie.ac.at/services/bibliothek-archiv) hilft, diese Arbeiten zu erschließen.

Wichtige Aussagen für die Bewertung von Abflussprozessen können aus der räumlichen Verbreitung und der Korngrößenzusammensetzung von Lockersedimenten abgeleitet werden. Die benötigten Informationen über die geologisch-hydrogeologische Situation hängen somit sehr stark von der Qualität der quartärgeologischen Kartierung ab. Eine Kartierung und Quantifizierung untergrundabhängiger Abflussprozesse existiert beispielsweise flächendeckend für Osttirol (Pirkl 2012). Neben der Verbesserung dieser Inhalte in den modernen Geologischen Karten wird die räumliche Lockersedimentverteilung laufend mithilfe von Laserscan-Auswertungen sowohl für die Geologische Kartierung als auch für angewandte Aspekte für große Gebiete des Bundesgebietes ergänzt. Entsprechende Informationen sind über die Webseite oder in der Bibliothek der Geologischen Bundesanstalt zu erfahren.

Der ÖWAV-Arbeitsbehelf 47 „Bodenfunktionen in der Wasserwirtschaft“ zielt darauf ab, die wasserwirtschaftlich wesentlichen Prozesse im Boden und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Wasserversorgung zu beschreiben und als Arbeitsbehelf zur Verfügung zu stellen (ÖWAV 2016).

Die Digitale Bodenkarte Österreichs (eBOD) des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) gibt für landwirtschaftliche Flächen in Österreich mehrere für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung relevante Parameter an: Die Gründigkeit (seicht bis tiefgründig) kann beispielsweise als Maß für die Bodentiefe herangezogen werden (Abb. 2.1), die Durchlässigkeit (gering bis hoch durchlässig) als Maß für die hydraulische Leitfähigkeit und die Wasserverhältnisse (trocken bis nass) als Maß für die Bodenfeuchte. In allen Fällen sind die Angaben keine absoluten Werte, wie sie für die Modellierung direkt verwendet werden könnten, sondern relative Werte, die eine Aussage über die Verteilung der Parameter innerhalb des Gebietes geben, insbesondere im Hinblick auf die Bodenspeicherparameter und Parameter zur Wasserleitfähigkeit in Abflussmodellen. Der Erfassungsmaßstab ist 1:10.000 und die Karte ist online verfügbar (eBod 2016).

Für Waldflächen stehen Informationen der Waldinventur des Instituts für Naturgefahren in Innsbruck (BFW) auf Anfrage zur Verfügung.

Das Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (BAW) in Petzenkirchen und das BFW entwickelten im Auftrag der Niederösterreichischen Landesregierung und der Wildbach- und Lawinenverbauung ein Modell (HydroBod NÖ) zur Abschätzung der hydrologischen Reaktion eines Standorts auf ein Starkniederschlagsereignis (ÖWAV 2016). Mittels Pedotransferfunktionen wurden die bodenphysikalischen Kennwerte der eBOD und der Waldinventur in die bodenhydrologischen Kennwerte Gesamtporenvolumen, nutzbare Feldkapazität und vertikale gesättigte Wasserleitfähigkeit übergeführt. Als Resultat liegen somit für ganz Niederösterreich homogene, flächendeckende Datensätze für bodenphysikalische und bodenhydrologische Kennwerte vor. Darüber hinaus wurde aus den verfügbaren Daten eine abflussspeichernde Bodenmächtigkeit abgeleitet und der potenziell verfügbare Bodenspeicher ermittelt.

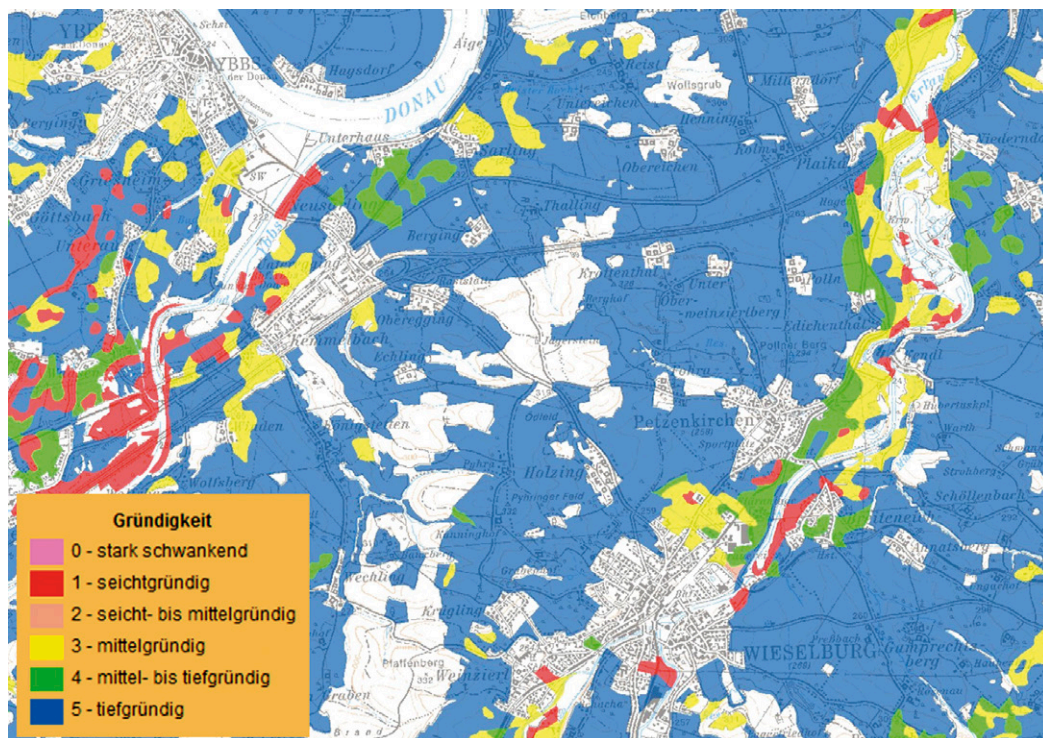


Abb. 2.1 Ausschnitt aus der Digitalen Bodenkarte Österreichs (eBOD). Dargestellt ist die Gründigkeit (seicht bis tiefgründig), die bei Niederschlag-Abfluss-Modellen als Maß für die Bodentiefe herangezogen werden kann (http://gis.bmnt.gv.at/eBOD/frames/index.php?&146=true&gui_id=eBOD)

Für Teilgebiete Österreichs stehen mitunter detailliertere Bodendaten zur Verfügung. Wenn keine Bodendaten für das zu modellierende Gebiet vorliegen, sollten sie nach Möglichkeit direkt erhoben werden. Das kann im Rahmen von Gebietsbegehungen geschehen. Bei größeren Gebieten sollten nach Möglichkeit zumindest ausgewählte, für die Modellierung besonders wichtige Bereiche begangen werden (siehe Kapitel 4.). Bei Fehlen adäquater Bodeninformationen besteht mit gewissen Annahmen auch die Möglichkeit der Übernahme (Übertragung) von Bodeneigenschaften aus ähnlichen Gebieten oder von Informationen zu typischen Böden bzw. Bodenprofiltypen aus Dokumentationen (siehe Kapitel 4. sowie Richard und Lüscher 1983).

2.1.4. Vegetation, Landnutzung

Die räumliche Verteilung der Vegetation beeinflusst direkt die Verdunstung und indirekt die Bodenentwicklung und damit die Abflussbildung. Andere Landnutzungen wie versiegelte Flächen (Verkehrsflächen, städtische Gebiete) und Gletscherflächen haben ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Abflussbildung.

Der europaweite Corine-Datensatz wurde aus Landsat-Satellitendaten abgeleitet. Es ist ein Vektordatensatz, der für Österreich 28 Landbedeckungsklassen unterscheidet. Die kleinste berücksichtigte Flächeneinheit ist 25 ha. Die sogenannten Seger-Daten (Seger 2001) sind eine Kartierung von Nutzungs- und Oberflächentypen aus visueller Fotointerpretation von Satellitenbildern (KFA 1000, Landsat TM) und aus topografischen sowie thematischen Karten. Die kleinste Erhebungseinheit ist ca. 2 ha, mit insgesamt 78 Landbedeckungs- bzw. Landnutzungstypen. Die Daten liegen für ganz Österreich vor. Sie repräsentieren den Stand zwischen 1994 und 1999. Für einzelne Bundesländer und insbesondere Kommunen liegen oft detailliertere Informationen über die Landnutzung vor, die in den jeweiligen GIS-Systemen vorgehalten werden. Für manche Regionen liegen Karten von landwirtschaftlichen Drainagen vor, die allerdings nicht immer der Realität entsprechen.

Landnutzungsänderungen stehen meist im Zusammenhang mit der Zunahme von versiegelten Flächen und Veränderungen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung. Sie spielen daher vor allem bei lokalen Starkregenbetrachtungen und bei der Modellierung von Wasser- und Stofftransport eine Rolle, aber auch für die Wasserhaushaltskomponenten Verdunstung und Speicherung. Derartige Änderungen werden meist durch unterschiedliche Landnutzungsklassen bei unterschiedlichen Berechnungsläufen (Szenarien) der Niederschlag-Abfluss-Modellierung berücksichtigt.

Sukzessive Änderungen können auch im Verlauf des Berechnungszeitraums berücksichtigt werden. Vegetation unterliegt einem eindeutigen Jahresgang, der die Komponenten des Wasserhaushalts, wie die Verdunstung, die Ausschöpfung des Bodenspeichers, die Abflussbildung, aber auch die hydraulischen Verhältnisse im Fließquerschnitt stark beeinflussen kann. Ähnliches gilt für die Abfolgen von Feldfrüchten oder das Aufwachsen eines Waldbestands. Diese können über zeitlich variierende Eingangsgrößen und Parameter im Modell abgebildet werden. Ein vegetationsspezifischer Parameter, der innerhalb des Jahres variiert, ist etwa der Leaf Area Index (LAI). Ein Beispiel für ein Modell, das derartige Veränderungen berücksichtigt ist AKWA-M (Abb. 2.2; Münch 1994; Wahren et al. 2009). Münch (1994) beschreibt einige Beispiele für Jahresverläufe vegetationsbeschreibender Größen wie Vegetationsbedeckungsgrad oder Wurzeltiefe für ausgewählte landwirtschaftliche Feldfrüchte.

Das Merkblatt ATV-DVWK-M 504 (ATV-DVWK 2002) behandelt die Ermittlung der Verdunstung in Abhängigkeit von Landnutzung, Bewuchs und Boden, sowie deren zeitlichen Veränderungen (Entwurf, DWA 2016). Richtwerte für vegetationsspezifische Parameter zur Beschreibung der Verdunstung finden sich auch in Schulla (1996) und Jin and Zhang (2002). Weitere Informationsquellen sind Angaben zu landwirtschaftlichen Fruchtfolgen (von entsprechenden Fachinstitutionen), Luftbilder und Satellitendaten von unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten für die Landnutzung oder den Vegetationszustand, aber auch Geländebegehungen. Phänologische Beobachtungen der Wetterdienste (Chmielewski 2007) geben den Eintrittszeitpunkt

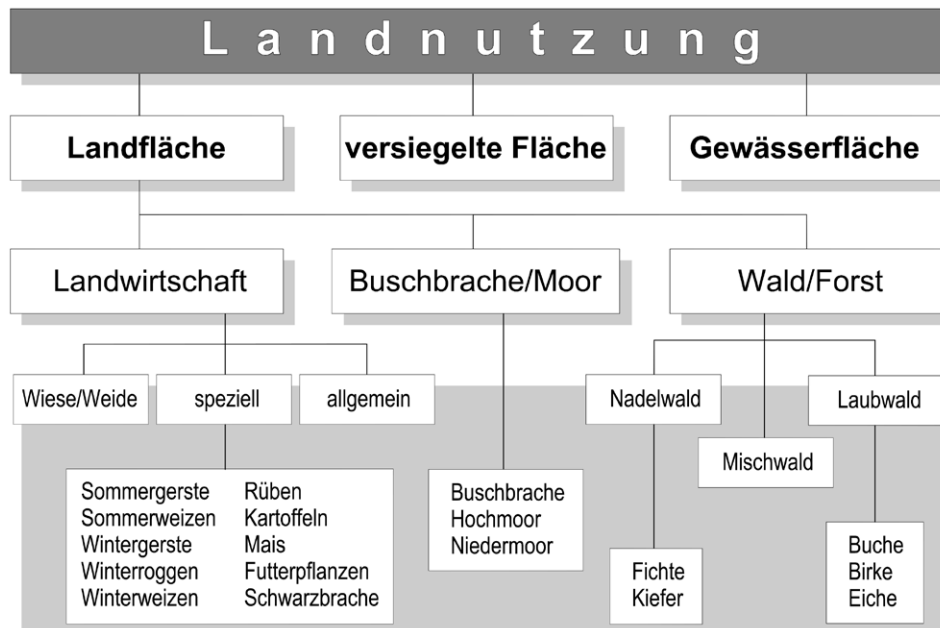


Abb. 2.2 Landnutzungen im Modell AKWA-M (aus Müller und Münch 2000)

von markanten Stadien, z. B. Austrieb, Blüthenfaltung, Blüte, Reife, Laubverfärbung, Laubfall etc. an.

Signifikante Auswirkungen zeitlich veränderlicher Landnutzung auf das Abflussregime lassen sich meist nur in kleinen Einzugsgebieten feststellen. Für kleine, alpine Einzugsgebiete gibt es diesbezüglich zahlreiche Untersuchungen, z. B. zur Bewertung der Auswirkung von Versiegelungen auf den Oberflächenabfluss (Kleibinder et al. 2011) oder zur Abschätzung von Oberflächenabflussbeiwerten (Markart et al. 2004). Auch der Einfluss von Skigebieten (Pistenbau, Maschinenschnee) auf das Abflussverhalten ist meist nur kleinräumig. Je nach Dauer und Intensität der Niederschlagsereignisse kann sowohl eine Dämpfung als auch eine Verstärkung des Abflusses erfolgen (Kohl et al. 2001). Extreme Abflussereignisse in großen Einzugsgebieten werden im Regelfall durch lang anhaltende Dauerregen ausgelöst. Dabei sind vor allem die Eigenschaften der Böden im Einzugsgebiet und weniger die Vegetation bzw. Landnutzung für das Retentionsvermögen von Bedeutung. Auch deshalb sind in großen Einzugsgebieten die Zusammenhänge zwischen Landnutzung und Abflussspitzen nicht sehr stark ausgeprägt. Nachweisbar sind hier am ehesten Auswirkungen auf die Wasserbilanz (z. B. verstärkte Verdunstung durch Zunahme von bewaldeten Flächen; Hall et al. 2014; Rogger et al. 2017).

2.1.5. Kombinierte Informationen: Abflussdisposition, Abflussbeiwerte

Eingangsdaten in Niederschlag-Abfluss-Modelle sind manchmal Angaben zur potenziellen Abflussbereitschaft von Teilflächen (Abflussdisposition) und Abflussbeiwerte, die aus Gebiets-eigenschaften bzw. Feldbegehungen abgeleitet wurden. Entsprechend ihrer Eigenschaften, aber auch in Abhängigkeit vom Niederschlagsereignis und der Vorbefeuchtung, tragen die Teile eines Gebiets nicht in gleichem Umfang zum Abfluss bei. Es lassen sich abflussbildungsrelevante Flächen und dominante Abflussprozesse bzw. Abflussprozessstypen identifizieren. Markart et al. (2004) und Löhmannsröben et al. (2000) geben Anleitungen für die Abschätzung von Oberflächenabflussbeiwerten auf Basis von Gebietsbegehungen. Einen Bestimmungsschlüssel für hochwasserrelevante Flächen, aufbauend auf dem Konzept dominanter Abflussprozesse (siehe z. B. Peschke et al. 1999) entwickelte Scherrer (2006).

Mit dem HydroBod-Modell (ÖWAV 2016) können für definierte Niederschläge (Summe und durchschnittliche Intensität) dominante Abflussprozesse abgeleitet und Oberflächen- und Direktabflussbeiwerte abgeschätzt werden. Bei den dominanten Abflussprozessen werden Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss bzw. Speicherung und Tiefenversickerung unterschied-

den. Innerhalb dieser Grundprozesse kann auch eine detaillierte Differenzierung in Teilprozesse erfolgen. Abb. 2.3 zeigt ein Beispiel.

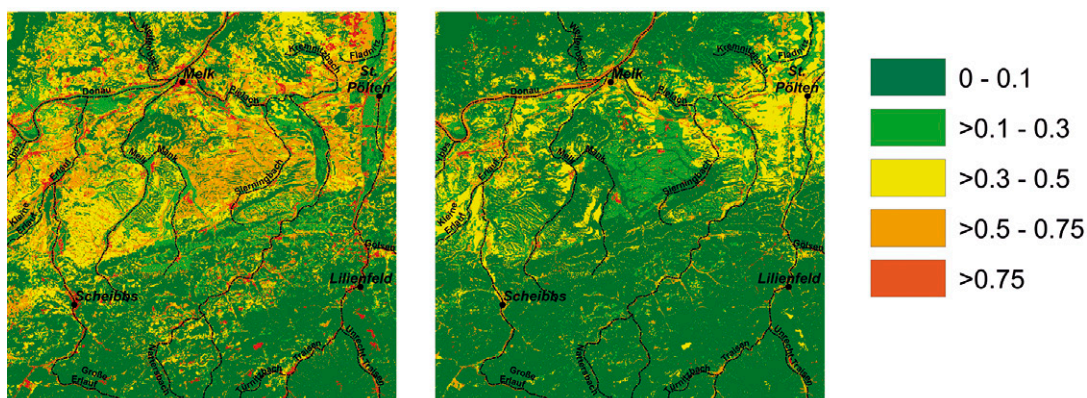


Abb. 2.3 Oberflächenabflussbeiwert (Endabflussbeiwert) für ein 60-Minuten-Starkregenereignis (links) und ein 12-Stunden-Starkregenereignis (rechts) für die Region südwestlich von St. Pölten (Klebinder et al. 2012)

Die Bodeneigenschaften unterliegen zeitlichen Veränderungen im Maßstab von Jahrhunderten (z. B. Bodenentwicklung), über Dekaden (Landnutzungsänderung, z. B. Aufforstungen) und jährlichen Schwankungen (saisonale Weidewirtschaft) bis zu Veränderungen innerhalb weniger Tage (z. B. Planierungen). Abb. 2.4 zeigt, dass an beweideten Rasenstandorten der Oberflächenabfluss im Herbst wesentlich höher als im Frühjahr war. Kurzfristig führte die Beweidung zu einer Erhöhung der toten Pflanzenteile am Boden und durch einen Strohdacheffekt zu einer vergrößerten Abflussbereitschaft im Herbst. Dieser Effekt kann im Winter zurückgesetzt werden. Dauert die Beweidung allerdings an, kann sich die Wirkung in den Boden verlagern und es kann zur Ausbildung von Weidestaurohlen kommen, die über Jahrzehnte an aufgelassenen Weideflächen nachweisbar sind. Derartige saisonale Unterschiede sollten bei der Niederschlag-Abfluss-Modellierung berücksichtigt werden.

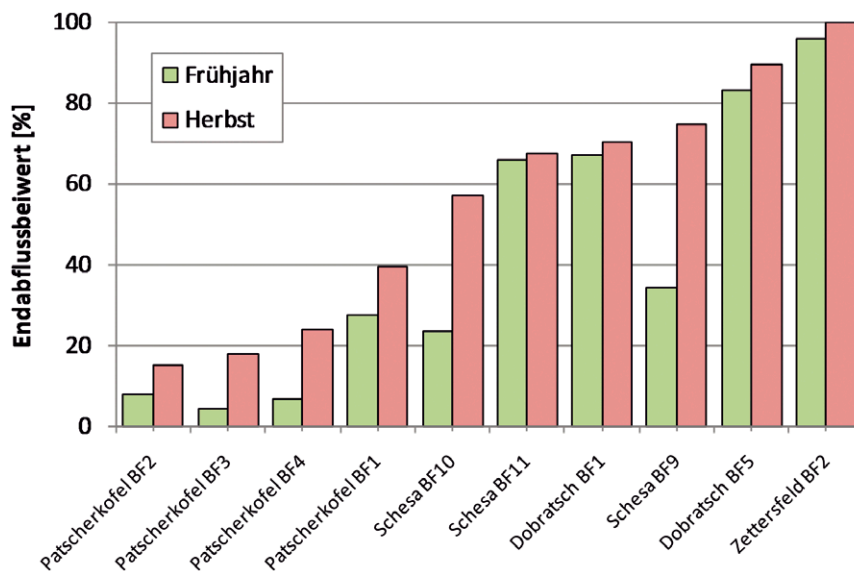


Abb. 2.4 Saisonale Veränderung im Abflussverhalten von beweideten Rasenstandorten. Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz – Starkregensimulation 100 mm/h (Kohl 2011)

BOX 2.2: Gebietseigenschaften

Es wird empfohlen, vorab alle vorhandenen Informationen zu Gebietseigenschaften zu sichten und auf ihre Relevanz in Hinblick auf die aktuelle Fragestellung der Niederschlag-Abfluss-Modellierung zu prüfen. Relevante Daten sollten für die Modellierung herangezogen werden. Ein Datensatz mit höherer räumlicher Auflösung ist nur dann relevant, falls er einen Genauigkeitsgewinn der Niederschlag-Abfluss-Modellierung gegenüber einem Datensatz mit geringerer Auflösung erbringt. Es wird empfohlen, die Daten der Gebietseigenschaften stichprobenartig vor Ort zu überprüfen. Insbesondere sind für kleine Gebiete das Gewässernetz und die Gebietsbegrenzung durch Begehung zu prüfen.

Für lokale Fragestellungen sind in der Regel lokale Daten der Gebietseigenschaften erforderlich. Falls solche nicht vorliegen, sollten sie direkt im Rahmen von Gebietsbegehungen erhoben werden. Grundsätzlich ist einer Gebietsbegehung der Vorzug vor einer ausschließlichen Nutzung von GIS einzuräumen. Es wird auch empfohlen, sich mit den lokal bzw. regional zuständigen Institutionen betreffend der Verfügbarkeit und der Datenqualität von Gebietseigenschaften in Verbindung zu setzen.

2.2. Niederschlag und andere meteorologische Größen**2.2.1. Erhebung und Auswahl von Stationsdaten**

Grundsätzlich sollten möglichst alle verfügbaren Niederschlagsstationen im zu modellierenden Gebiet verwendet werden. Liegt im konkreten Untersuchungsgebiet keine Niederschlagsstation, sind Niederschlagsdaten aus der Umgebung heranzuziehen. Kriterien für die Auswahl der Niederschlagsstationen sind:

- Repräsentativität (räumlich und zeitlich) für das zu modellierende Gebiet: Entfernung zum Gebiet, Höhenlage, typische Zugrichtung von Niederschlagsfeldern, hydrologische Ähnlichkeit.
- Datenqualität und Verfügbarkeit, z. B. Reihenlänge, zeitliche Auflösung.

Empfohlen wird eine umfassende Datenerhebung, wobei Datenqualität und Historie beachtet werden sollten. Auch Stationsdaten aus der Umgebung des zu modellierenden Gebietes sollten Berücksichtigung finden. Empfehlenswert ist auch die Erhebung von Zusatzinformationen, z. B. aus Ereignisdokumentationen, Chroniken, Projektberichten, berechneten oder geschätzten hydrologischen Werten.

Die für die Modellierung erforderliche zeitliche Auflösung der Eingangsdaten entspricht der zeitlichen Auflösung des Niederschlag-Abfluss-Modells, die in Abhängigkeit von der Prozessdynamik und der Aufgabenstellung zu wählen ist, d. h. kleiner als die charakteristische Reaktionszeit des Einzugsgebietes bzw. der Teilgebiete, wenn diese Dynamik von Interesse ist (siehe Kapitel 3.2.3.). Für Hochwasseruntersuchungen in städtischen Einzugsgebieten oder kleinen ländlichen Einzugsgebieten wird die Auflösung i. A. zu wenigen Minuten gewählt, in großen Einzugsgebieten im Bereich von Stunden. Für Wasserhaushaltsberechnungen kann die zeitliche Auflösung von Stunden bis 1 Monat reichen. Oft werden Modelle mit Tagesauflösung gewählt.

Der Niederschlag kann mit Ombrometern gemessen werden, die täglich um 7 Uhr abgelesen werden, und mit Ombrografen, bei denen die Aufzeichnung automatisch mit höherer zeitlicher Auflösung erfolgt (Abb. 2.5). Der Hydrographische Dienst in Österreich betreibt derzeit (Stand 2018) rund 1.000 Niederschlagsmessstellen, davon sind ca. 540 Ombrografen- und ca. 900 Ombrometerstationen (Abb. 2.6). Darüber hinaus gibt es in Österreich zahlreiche Messstellen weiterer Betreiber, wie z. B. der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) sowie von Kraftwerksgesellschaften (siehe Kapitel 7.). Von diesen erhält der Hydrographische Dienst Niederschlagsdaten von ca. 220 Ombrografen und 300 Ombrometern. Wei-

ters unterhält der Hydrographische Dienst derzeit ca. 730 Lufttemperaturmessstellen (andere Betreiber: 410) und 45 Verdunstungsmessstellen (andere Betreiber: 22).



Abb. 2.5 Ombrometer (Mitte), Ombrograf (rechts) und Temperaturmessung (links) in Altmanns, Waldviertel (Foto: Salzer)

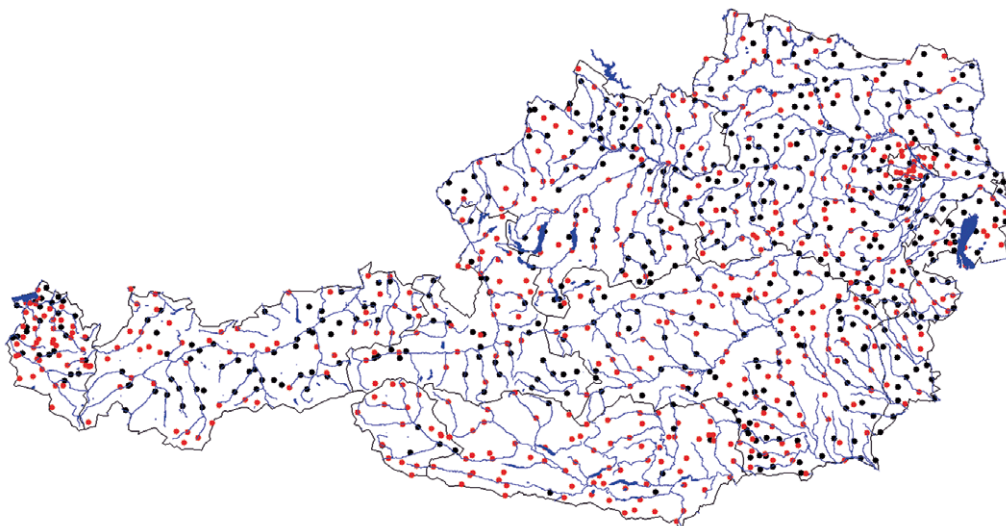


Abb. 2.6 Niederschlagsstationen des Hydrographischen Dienstes mit Tageswerten (schwarz) und zeitlich höher aufgelösten Werten (rot) in Österreich (Grafik: BMNT)

Sind im Untersuchungsgebiet nur wenige oder keine Niederschlagsdaten in hoher zeitlicher Auflösung (z. B. Stunden) verfügbar, können beobachtete Tagessummen des Niederschlags mithilfe zeitlich höher aufgelöster Niederschlagsdaten einer oder mehrerer anderer Stationen disaggregiert werden. Dazu kann das sogenannte Quadrantenverfahren herangezogen werden (Grebner 1995). Durch die betreffende Tageswertstation wird ein nordorientiertes rechtwinkeliges Achsenkreuz gelegt und in jedem Quadrant wird die nächstgelegene Niederschlagsstation mit hoher zeitlicher Auflösung ausgewählt, sofern diese nicht einen maximalen Abstand überschreitet (30 km, in: Merz et al. 2006). Sodann wird für jede dieser maximal vier Stationen das Verhältnis jedes Stundenwertes und des Tageswertes an dieser Station gebildet. Diese Verhältnisse werden entsprechend der Distanz zur untersuchten Station gewichtet (mit dem Kehrwert der Distanz: Merz et al. 2006). Das gewichtete Mittel der Verhältnisse der maximal vier Stationen wird dann verwendet, um den Tagesniederschlag der betreffenden Station auf Stundenwerte (oder höher aufgelöst) zu disaggregieren. Dadurch entspricht die Summe der Niederschläge innerhalb des Tages wieder dem beobachteten Tageswert.

Für advective Niederschlagsituationen ist diese Vorgehensweise gut anwendbar, für konvektive Situationen sind erhebliche Abweichungen vom tatsächlichen lokalen Niederschlagsverlauf zu erwarten. Durch die Mittelbildung der vier Stationen erfolgt eine Glättung, wodurch i. A. die Niederschlagsspitzen unterschätzt werden. Alternativ kann die Disaggregation mit einer zeitlich hoch aufgelösten Station erfolgen. Diese Vorgangsweise ist zwar räumlich weniger repräsentativ, allerdings tritt keine Glättung auf. Ein Beispiel zeigt Abb. 2.7.

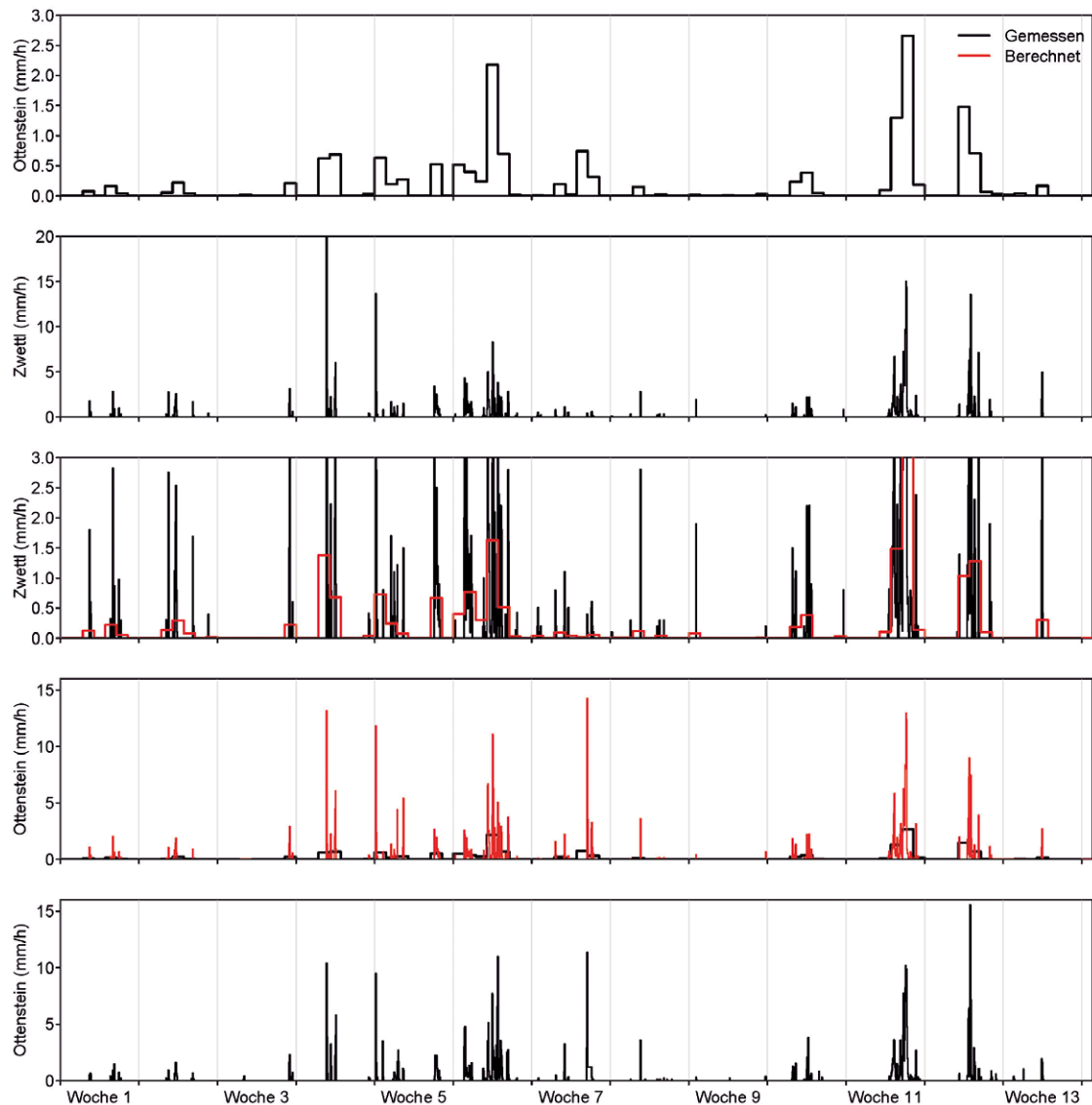


Abb. 2.7 Disaggregation der Tageswerte des Niederschlags an der Station Ottenstein mittels Stundenwerten der Station Zwettl. Von oben nach unten: gemessene Tageswerte in Ottenstein; gemessene Stundenwerte in Zwettl; gemessene Stundenwerte in Zwettl (schwarz) und zu Tageswerten aggregiert (rot); gemessene Tageswerte (schwarz) und auf Stunden disaggregierte Werte (rot) in Ottenstein; gemessene Stundenwerte in Ottenstein zum Vergleich

BOX 2.3: Auswahl der Niederschlagsdaten

Grundsätzlich sollten möglichst alle verfügbaren Niederschlagsstationen im zu modellierenden Gebiet verwendet werden. Liegt im konkreten Untersuchungsgebiet keine Niederschlagsstation, sind Niederschlagsdaten aus der Umgebung heranzuziehen. Empfohlen wird eine umfassende Datenerhebung, wobei Datenqualität und Historie beachtet werden sollten. Auch Stationsdaten aus der Umgebung des zu modellierenden Gebiets sollten Berücksichtigung finden. Empfehlenswert ist auch die Erhebung von Zusatzinformationen, z. B. aus Ereignisdokumentationen, Chroniken, Projektberichten, berechneten oder geschätzten hydrologischen Werten.

2.2.2. Datenprüfung und Korrektur

Niederschlagsdaten werden in Österreich vom Hydrographischen Dienst, der ZAMG und anderen, oft privaten Messstellenbetreibern, z. B. Kraftwerksgesellschaften, in der Regel nach den folgenden Richtlinien und Anleitungen erhoben: ÖNORM 2400 bis 2403, EN ISO 748, 772, 6416, 14028, Anleitung zur Beobachtung und Messung von meteorologischen Parametern (BMLFUW 2007b). Dennoch sind wegen der Schwierigkeit des Messprozesses gewisse Ungenauigkeiten bzw. Fehler nicht auszuschließen. Deshalb unterzieht der Hydrographische Dienst in Österreich die Daten seines Messnetzes einer umfangreichen Qualitätskontrolle und stellt geprüfte Daten zur Verfügung. Die Qualitätsprüfung umfasst die Ergänzung fehlender Daten und die Korrektur fehlerhafter Daten (Mess-, Aufzeichnungs-, Geräte-, Eingabefehler) sowie die Prüfung auf Plausibilität mithilfe visueller und rechnerischer Methoden (Müller 2006). Korrigierte Daten werden als solche gekennzeichnet.

Der Hydrographische Dienst führt eine teilautomatische Prüfung durch, bestehend aus einem Vergleich mit anderen Messstellen und einer messstelleninternen Prüfung. Messstellenintern bedeutet, dass mit anderen Parametern, gemessen an derselben Messstelle, verglichen wird. Wenn es z. B. keinen Niederschlagsmesswert (kann sowohl Regen als auch Schnee sein), jedoch einen Messwert für Neuschnee gibt, so ist dieser zu hinterfragen. Ebenso kann ein Vergleich mit der Lufttemperatur hilfreich sein. Eine Prüfung erfolgt auch durch Gegenüberstellung der Tagessummen von Ombrometer und Ombrograf. Weiters werden zahlreiche Prüfungen hinsichtlich der Niederschlagszeitpunkte, eine Grenzwertprüfung bzw. Prüfung, ob Werte in einem plausiblen Wertebereich liegen, sowie eine Verlaufsprüfung (Ganglinienverlauf, Anstiege, Gradienten) durchgeführt. Es kann davon ausgegangen werden, dass Tages- und Monatssummen des Niederschlags gut überprüft sind. Höher aufgelöste Daten (z. B. Stundenwerte) sind eher ungeprüft, wobei jedoch eine Prüfung auf Ausreißer erfolgt. Folgende Datenprüfungen werden empfohlen:

(a) *Prüfung auf Ausreißer und Fehlwerte:* Als erster Schritt ist jedenfalls eine grafische Darstellung der Niederschlagsdaten und visuelle Überprüfung in Hinblick auf offensichtliche Ausreißer (sehr große Werte, negative Werte) und Fehlwerte zu empfehlen (sogenanntes Quick-Screening). Abb. 2.8 zeigt typische Fehlersymptome. Ausreißer können auch numerisch überprüft werden. Bei extrem hohen Werten muss geprüft werden, ob Messfehler vorliegen oder eventuell lokal tatsächlich so hohe Niederschläge gefallen sein können. Eine derartige Überprüfung ist besonders für hochaufgelöste Niederschlagsdaten (Stunden- oder Minutenwerte) in der Regel erforderlich. Korrekturen können z. B. mittels der Quadrantenmethode erfolgen und mittels Korrelationen mit vergleichbaren Niederschlagsstationen, eventuell unter Zuhilfenahme von Radarbildern.

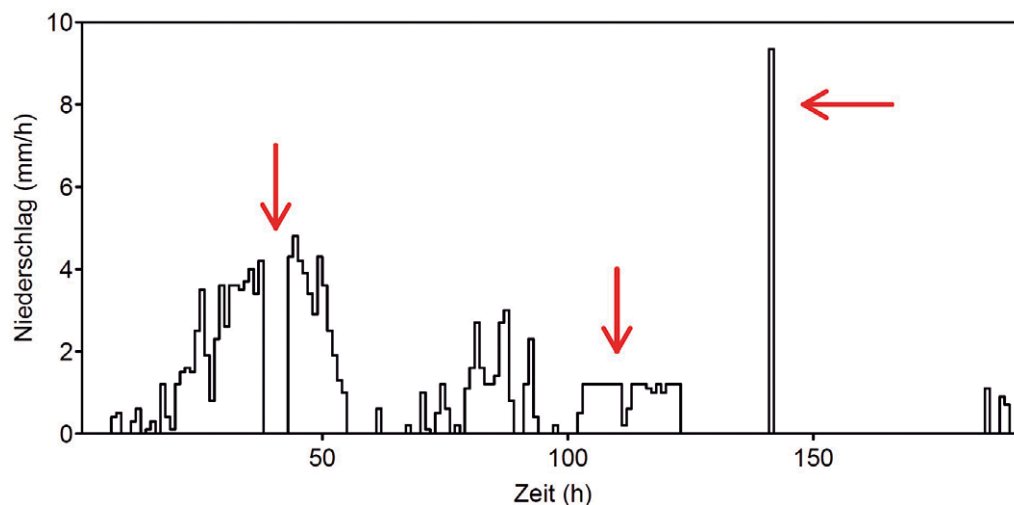


Abb. 2.8 Typische Fehler bei hochaufgelösten Niederschlagszeitreihen: Ausfall, Beschränkung auf einen konstanten Wert, sehr großer Einzelwert

(b) *Prüfung im Vergleich zu Nachbarstationen:* Als zweiter Schritt ist eine Doppelsummenanalyse zu empfehlen. Dabei wird die Niederschlagssumme (kumulativ) ab Beginn der Messung mit der Niederschlagssumme einer vergleichbaren Niederschlagsstation im gleichen Zeitraum verglichen. Der Zusammenhang sollte bei gleichbleibender Datenqualität ungefähr eine Gerade bilden. Ist dies nicht der Fall, so gibt ein vorhandener Knick (Abb. 2.9) einen Hinweis darauf, dass ab einem bestimmten Zeitpunkt eine Station systematisch größere oder kleinere Niederschlagsmengen gemessen hat. Dies ist mit etwaigen Stationsverlegungen, Änderungen des Messgeräts, Änderungen in den Aufstellungsbedingungen (z. B. Abschattung, Aufstellungshöhe) abzugleichen und bei Erkennen der Ursache zu korrigieren. Abb. 2.9 zeigt ein Beispiel: Während die Station Längenfeld seit Beobachtungsbeginn fast an gleicher Position blieb, wurde die Station Telfes im Stubai im Jahre 1984 verlegt (alte Seehöhe 895 m, neue Seehöhe 1.070 m). Dadurch veränderten sich die Bedingungen für die Messung. Wenn ein Standort sowohl mit einem Ombrografen (Niederschlagsschreiber) als auch mit einem Ombrometer (händische Erfassung von Tagessummen) ausgestattet ist, sind die hochaufgelösten Niederschlagsdaten des Schreibers mit den Tagessummen des Ombrometers zu vergleichen und gegebenenfalls zu korrigieren, da diese in der Regel zuverlässiger sind. Monatswerte (Mittel, Summen) ergeben sich aus den Tageswerten. Sie können einerseits mit Werten von Nachbarstationen und andererseits mit langjährigen Mittelwerten verglichen werden, wobei das aktuelle Witterungsgeschehen zur Interpretation zu berücksichtigen ist. Dies kann z. B. den Monats- und Jahresberichten der ZAMG oder der Hydrographischen Dienste entnommen werden.

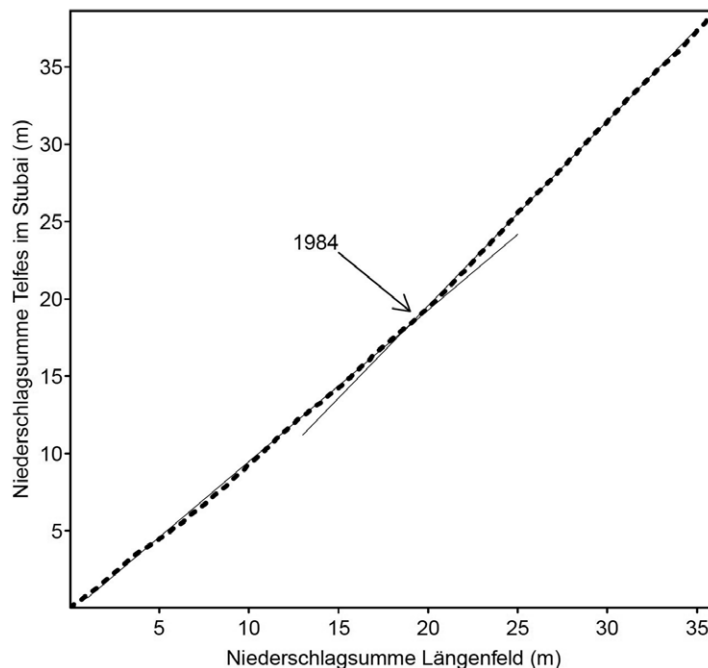


Abb. 2.9 Doppelsummenanalyse für den Niederschlag der Stationen Längenfeld und Telfes im Stubai (Tirol) in den Jahren 1958 bis 2006. Die Station Telfes im Stubai wurde 1984 verlegt

Hinweise auf besonders große Niederschläge geben Ereignisdokumentationen und Schadensbilder von Hochwässern im regionalen Kontext. Dies soll am Beispiel des Ereignisses im Einzugsgebiet der Thaya am 30. Juni 2006 erläutert werden. Im nördlichen Waldviertel setzten am Abend des 29. Juni 2006 intensive Niederschläge ein. Die hohen Intensitäten hielten bis Mitternacht an und ließen erst in den Morgenstunden des 30. Juni 2006 nach. Der Schwerpunkt der Niederschläge lag im Einzugsgebiet der mährischen Thaya in Tschechien und im Bereich aller kleinen Zubringer der Thaya ab Waidhofen/Thaya bis nach Hardegg. An der Messstelle Riegersburg bei Hardegg wurde in 24 Stunden eine Summe (29.6. 7:00 Uhr – 30.6. 7:00 Uhr) von 190 mm Regen gemessen. Laut Auswertung des Datensammlers fielen davon 173 mm allein in der Zeit zwischen 19:00 und 1:00 Uhr Nachts. An der Messstelle Weikertschlag/Thaya wurde vom Beobachter eine 24-h-Summe von 201 mm gemeldet. Die resultierenden Hochwasserabflüsse erreichten im weiter südlich gelegenen Schwarzenau an

der Thaya gerade ein HQ_7 und im weiter westlich gelegenen Hoheneich am Braunaubach (Lainsitzgebiet) ein HQ_{30} . In Raabs an der Thaya wurde jedoch das HQ_{100} deutlich überschritten – eine Bestätigung dafür, dass die Niederschläge im Schwerpunktgebiet tatsächlich in einer entsprechenden Größenordnung gelegen haben müssen. Ebenso lagen Schadensmeldungen aus dem Gebiet vor. Zur Plausibilisierung der Stationswerte des Niederschlags trug wesentlich eine räumliche Analyse mithilfe der Stationswerte und der Radarbilder des Tschechischen Hydrometeorologischen Dienstes bei. Der Starkniederschlag umfasste das gesamte tschechische und österreichische Gebiet der mährischen Thaya. Das Gebiet der deutschen Thaya wurde nördlich Waidhofen bis zur Mündung der mährischen Thaya extrem überregnet, doch nahm der Niederschlag gegen Süden rasch ab. Aufgrund der Radarbilder wurde für Weikertschlag eine Niederschlagszeitreihe mit 1-h-Auflösung rekonstruiert. Diese ergab eine maximale 1-h-Summe von mehr als 80 mm (Abb. 2.10).

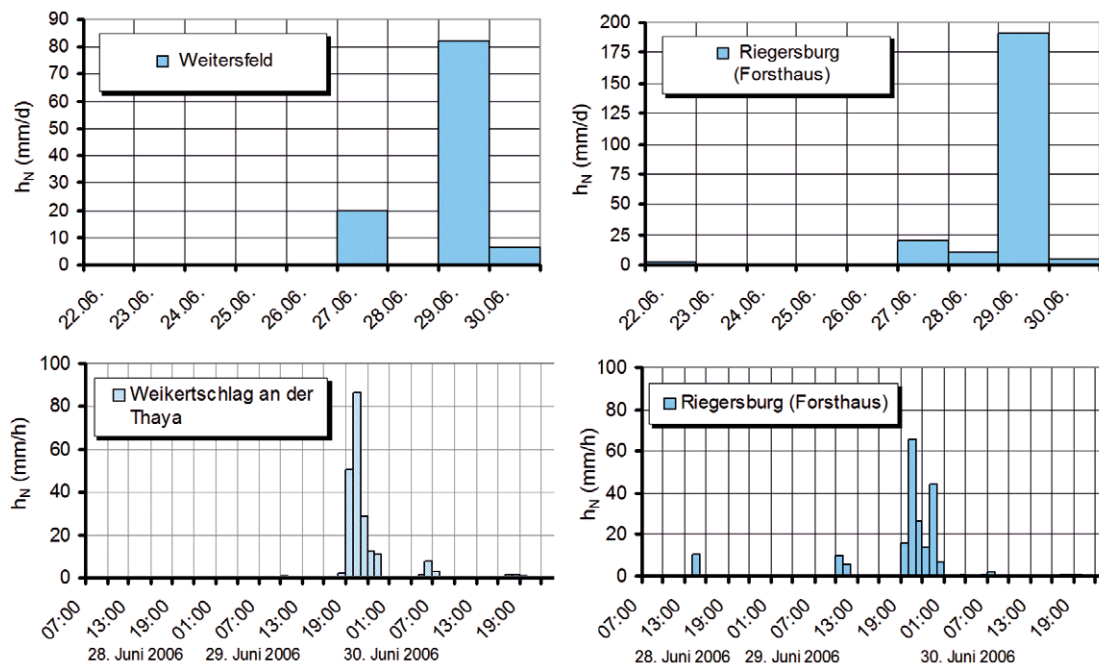


Abb. 2.10 Oben: Tagessummen des Niederschlags vom 27.-30.06.2006 an Messstellen im nördlichen Waldviertel. Unten: Rekonstruierte Stundenwerte in Weikerschlag und gemessene Stundenwerte in Riegersburg (aus: Godina et al. 2007)

(c) *Prüfung mittels Wasserbilanz:* Eine weitere zu empfehlende Prüfung ist der Vergleich mit Abflussdaten im Gebiet. Dafür ist es notwendig, den langjährigen mittleren Niederschlag innerhalb des Gebietes auf Basis der Stationsdaten zu bestimmen. Die Differenz zwischen langjährigem mittlerem Gebietsniederschlag und langjährigem mittlerem Abfluss entspricht der mittleren (aktuellen) Gebietsverdunstung, da die Gebietsspeicherung als vergleichsweise klein angesehen werden kann (außer bei Gebieten mit erheblichem Gletscheranteil). Abb. 2.11 gibt die mittlere aktuelle Verdunstung für österreichische Flussgebiete an, ermittelt aus der Wasserbilanz (Kling et al. 2005). Für einzelne Einzugsgebiete kann die aktuelle Verdunstung davon abweichen und liegt zwischen maximal 700 mm/a im Osten Österreichs bis ca. 200 mm/a in manchen hochalpinen Gebieten. Zum Vergleich gibt Abb. 2.11 auch die potenzielle Verdunstung an (unter der Annahme, dass der Boden ständig ausreichend feucht ist). Weichen die aus den Daten ermittelten Verdunstungswerte vom angegebenen Bereich ab, kann dies auf drei Gründe zurückzuführen sein: (i) systematische Messfehler des Niederschlags; (ii) systematische Messfehler des Abflusses; (iii) das Gebiet ist hydrologisch nicht geschlossen (weitere Zu- oder Abflüsse bzw. die Speicheränderungen im Gebiet müssen mitberücksichtigt werden). Wenn Ursachen identifiziert werden können, sind die Daten zu korrigieren.

Zur Orientierung kann auch die an den Verdunstungsmessstellen des Hydrographischen Dienstes in den Sommerhalbjahren ermittelte potenzielle Verdunstung herangezogen werden, deren Monatssummen im Hydrographischen Jahrbuch von Österreich veröffentlicht werden.

Zu beachten ist dabei, dass diese Messwerte eher lokale Aussagekraft besitzen und gemäß ihrer Gewinnung eigentlich die Verdunstung von einer freien Wasseroberfläche eines seichten Wasserkörpers beschreiben, die meist etwas größer als die potenzielle (Gras-Referenz) Verdunstung ist.

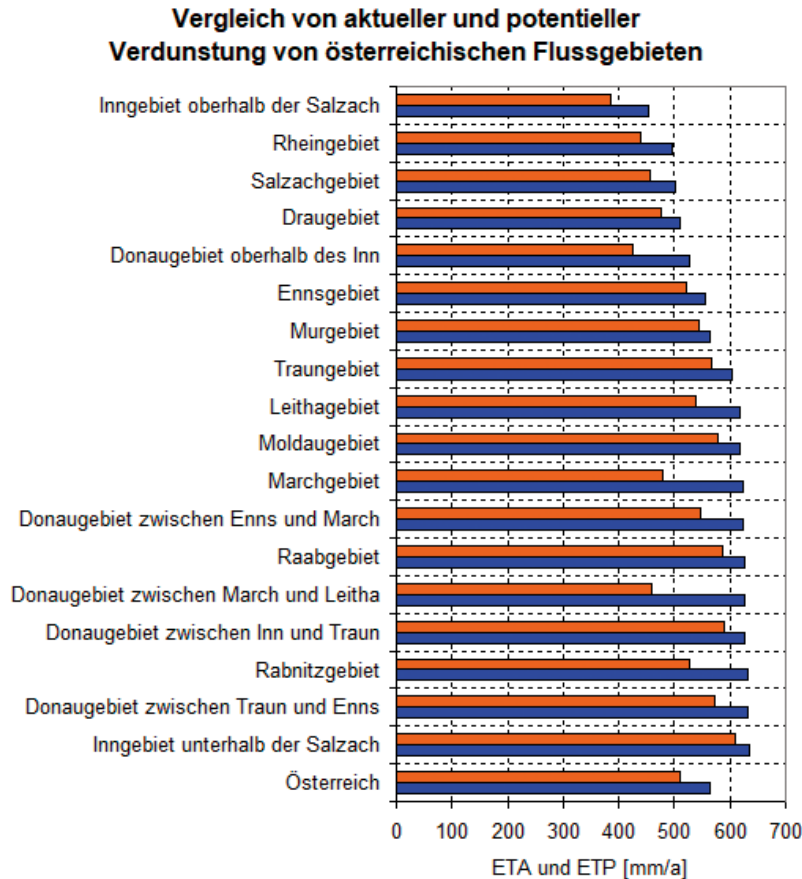


Abb. 2.11 Potenzielle Verdunstung (ETP, blau) und aus der Wasserbilanz bestimmte aktuelle Verdunstung (ETA, rot) von österreichischen Flussgebieten, Periode 1961 – 1990 (Kling et al. 2005)

(d) *Korrektur systematischer Messfehler*: Niederschlagsmesswerte weisen einen systematischen Fehler aufgrund von Benetzungs- und Verdunstungsverlusten sowie infolge Windinflusses auf (Tab. 2.1). Besonders bei Schneeniederschlägen können die systematischen Messfehler sehr groß sein. Systematische Fehler sind aber nicht nur für länger andauernde Niederschlagsereignisse und für Schnee relevant. Auch bei konvektiven Ereignissen können bei hohen Regenintensitäten und starkem Wind die Messwerte wesentlich geringer als die tatsächlich gefallene Menge sein. Zu beachten ist bei längeren Datenreihen, dass moderne Messgeräte wesentlich höhere Niederschlagsintensitäten erfassen können als alte Geräte. Gemessene Zunahmen der Niederschlagsintensität können deshalb die Änderung der Messmethode und nicht notwendigerweise eine Änderung des Klimas widerspiegeln.

Die systematischen Messfehler des Niederschlags wurden in zahlreichen Arbeiten untersucht (Sevruk 1985; Richter 1995; Rubel 1999; Ungersböck et al. 2001; Hoppe 2006; Lanza and Stagi 2009; Sevruk et al. 2009; WMO 1994, 2006, 2009), die auch Korrekturmethode als Funktion der Windgeschwindigkeit, Lage und Exponiertheit der Station, Niederschlagsart und anderer Einflussfaktoren angeben (siehe Tab. 2.1). Derartige Korrekturmethode beziehen sich zumeist auf Monats- und Jahreswerte des Niederschlags. Bei Tageswerten und zeitlich höher aufgelösten Niederschlagsdaten hängen die Fehler von den jeweiligen Ereignisseigenschaften ab, die in der Regel unbekannt sind. Deswegen sind kürzere Zeitintervalle schwieriger zu korrigieren. Bei Wasserhaushaltsmodellen akkumulieren sich allerdings systematische Fehler auch bei höher aufgelösten Niederschlagsdaten und können zu massivem Fehlverhalten der Modelle führen. Deshalb ist in diesem Fall eine Korrektur jedenfalls zu empfehlen. Für alle Zeit-

diskretisierungen (von Minuten bis Jahre) stehen zwei Möglichkeiten der Korrektur zur Verfügung. Zum einen können die o. a. Korrekturmethode auf Basis der Windgeschwindigkeit etc. herangezogen werden. Dabei ist zu beachten, dass international unterschiedliche Messgeräte bzw. Messprinzipien eingesetzt werden, und vor einer Übernahme von Korrekturfaktoren zu prüfen ist, ob diese auf die verwendeten Geräte, die klimatische Situation und die Aufstellungsbedingungen anwendbar sind. Wenn die Windgeschwindigkeit nicht auf der gleichen Höhe wie der Niederschlag gemessen wird, muss die Windgeschwindigkeit angepasst werden, wodurch weitere Unsicherheiten entstehen. Zum anderen enthalten die meisten Wasserhaushaltsmodelle einen oder mehrere Modellparameter, die den systematischen Messfehler, insbesondere bei Schneeniederschlag abdecken sollen (Kapitel 3.3.1.). Diese Modellparameter werden aus den Abflussdaten kalibriert (siehe Kapitel 4.).

Die in den Hydrographischen Jahrbüchern Österreichs und über die Internetplattform eHYD (<http://ehyd.gv.at/>) publizierten Niederschlagswerte enthalten keine Korrekturfaktoren.

Tab. 2.1 Komponenten des systematischen Fehlers bei der Niederschlagsmessung (verändert nach WMO 1994)

Fehlerkomponente	Größe	Meteorologische Faktoren	Instrumentelle Faktoren
Verluste durch Windeinfluss	2 – 10 % Regen 10 – 50 % Schnee	Windgeschwindigkeit, Art des Niederschlags	Form, Öffnungsfläche und Tiefe, Aufstellungssituation des Gerätes im Vergleich zu Hindernissen
Benetzungsverluste	2 – 10 %	Häufigkeit, Art und Menge des Niederschlags, Zeit ohne Niederschlag	wie oben, zusätzlich Material, Farbe und Alter
Verdunstungsverluste aus dem Sammelbehälter	0 – 4 %	Art des Niederschlags, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit	Öffnungsfläche und Isolation des Auffangbehälters, Farbe, Typ des Trichters
Herausspritzen	1 – 2 %	Niederschlagsintensität und Windgeschwindigkeit	Form und Tiefe des Messgeräts und Art der Installation

(e) Prüfung der Metainformationen: Schließlich wird empfohlen, die Informationen (Stammdaten) der Messstelle in Hinblick auf Lage, Höhe und insbesondere etwaige Stationsverlegungen und Änderung der Messmethodik zu prüfen. Es ist auch zu klären, auf welchen Zeitpunkt sich der mit den Daten abgelegte Zeitstempel bezieht, z. B. Ende oder Beginn des Zeitintervalls, über das der Niederschlag gemessen wurde. Diese Metainformationen können beim Stationsbetreiber eingeholt werden bzw. sind teilweise im Hydrographischen Jahrbuch dokumentiert. Die Internetplattform eHYD des Hydrographischen Dienstes in Österreich (<http://ehyd.gv.at/>) bietet ebenfalls Stammdaten zu den veröffentlichten Niederschlagsstationen an.

BOX 2.4: Qualitätssicherung der Niederschlagsdaten

Es wird empfohlen, beim Stationsbetreiber nachzufragen, ob und wie Niederschlagsdaten geprüft bzw. korrigiert worden sind. Ungeprüfte Daten sollten überprüft und korrigiert werden. Ein Quick-Screening inklusive grafischer Darstellung sollte immer erfolgen und fragliche Fälle oder Einzelsituationen mit den Stationsbetreibern besprochen werden.

Für die Überprüfung von Niederschlagsdaten wird empfohlen: eine Prüfung auf Ausreißer und Fehlwerte, ein räumlicher Vergleich mit benachbarten Stationen, ein zeitlicher Vergleich mit langjährigen Summen, Mittel- und Extremwerten und die Prüfung von Metainformationen. Besonderes Augenmerk sollte den Schneeniederschlägen gewidmet werden. Zur Plausibilisierung von langfristigen Jahreswerten wird die Anwendung der Wasserbilanz empfohlen.

Eine Korrektur des systematischen Fehlers von Messwerten des Niederschlags wird

- für Ereignismodelle nicht grundsätzlich empfohlen, sollte aber bei begründetem Verdacht, z. B. im Ergebnis der Plausibilitätsprüfung, durchgeführt werden;
- für Wasserhaushaltsmodelle auf der Grundlage der jeweiligen Stationseigenschaften, der Wasserbilanz und von Angaben in der Literatur empfohlen.

Die Korrektur der Niederschlagsdaten sollte in Abhängigkeit von den Bedingungen am jeweiligen Stationsstandort erfolgen. Eine Bereisung wird empfohlen.

2.2.3. Niederschlagsstatistik und Bemessungsniederschläge

Die Berechnung extremer Abflussereignisse erfolgt in der Regel mit Ereignismodellen auf Basis eines Bemessungsniederschlags vorgegebener Jährlichkeit. Seit 01.02.2009 bietet die Abteilung Wasserhaushalt im Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), jetzt Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT), Regenspendenlinien als Bemessungsniederschlag zur Verwendung an (Download: <http://ehyd.gv.at>). Österreichweit stehen derzeit Dauerstufen von 5 Minuten bis 6 Tagen und Jährlichkeiten von 1 bis 100 Jahren zur Verfügung, ausgewertet nach drei Methoden: (a) Extremwertstatistik ÖKOSTRA, (b) Maximierte Modellniederschläge (MaxModN), (c) Gewichtete Bemessungsniederschläge.

(a) *Extremwertstatistik ÖKOSTRA*: Das Akronym ÖKOSTRA bezeichnet die Österreichische Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierung und -Auswertung. Dabei wurden mittels Digitalisierungs- und Auswerteprogrammen aus Beobachtungsreihen jährliche und partielle Serien erzeugt. Partielle Serien enthalten alle über einem bestimmten Schwellenwert aufgetretenen Messwerte (z. B. innerhalb eines Jahres). Im Gegensatz dazu werden in einer jährlichen Serie nur die Jahreshöchstwerte ausgewiesen. Wegen Messfehlern mancher Geräte bei Extremereignissen (speziell bei Hebern) und einer ungleichen Verteilung der Stationen (mehr Stationen in Tallagen mit kleinen Niederschlägen) wird der tatsächlich auftretende Niederschlag bei kurzen Dauerstufen durch ÖKOSTRA tendenziell unterschätzt.

(b) *Maximierte Modellniederschläge (MaxModN)*: Für Bemessungsfragen in kleinen Einzugsgebieten sind vor allem Starkregen kurzer Dauer mit vorwiegend konvektivem Charakter von Bedeutung. Dieser Niederschlagstyp überregnet meist nur verhältnismäßig kleine Flächen mit hoher Intensität. Da für kleine Einzugsgebiete bzw. im alpinen Gelände häufig die erforderlichen Beobachtungsdaten fehlen, wurden die Niederschlagshöhen für bestimmte Dauerstufen und Jährlichkeiten mittels meteorologischer Modelle berechnet und im Digitalen Hydrologischen Atlas von Österreich (BMLFUW 2007) veröffentlicht. Dauerstufen unter 12 Stunden stammen aus einem meteorologischen Modell für konvektiven Niederschlag (Lorenz und Skoda 2002), Dauerstufen über 12 Stunden aus dem Vorhersagemodell ALADIN. Im Übergangsbereich zwischen 6 Stunden und 48 Stunden wurden die Daten der beiden Modelltypen dauerstu-

fenabhängig gewichtet (Weilguni 2009). Diese Niederschläge werden als MaxModN-Daten bezeichnet. Sie sind von Niederschlagsmodellrechnungen unter maximierten Rand- und Anfangsbedingungen abgeleitet und liefern deshalb im Vergleich zu den extremwertstatistischen Messstellenauswertungen zum Teil starke Überschätzungen. Hundertjährige MaxModN-Niederschläge wurden jedoch vereinzelt schon beobachtet (z. B. in Ladis und Innervillgraten in Tirol, in Salzburg, in Oberösterreich und am Nassfeld in Kärnten).

(c) *Gewichtete Bemessungsniederschläge*: Durch die MaxModN-Werte (eher „zu hoch“) und die ÖKOSTRA-Werte (eher „zu niedrig“) wird die Bandbreite möglicher Bemessungsniederschläge abgegrenzt (siehe Abb. 2.12). Nicht auszuschließen ist, dass in Einzelfällen der Bemessungswert auch außerhalb dieses Schwankungsbereichs liegen kann (Weilguni 2009). Eine dauerstufenabhängige, gewichtete Mittelwertbildung zwischen ÖKOSTRA- und den MaxModN-Werten führte zu den gewichteten *Bemessungsniederschlägen* (ÖWAV 2007a).

Alle drei Niederschlagsauswertungen (ÖKOSTRA-, MaxModN- und gewichtete Bemessungsniederschläge) geben Werte an, die für einen Rasterpunkt gültig sind (Tab. 2.2). Für die Detailplanung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen sind diese (Basis-)Bemessungsniederschläge mit statistischen Auswertungen von Stationsdaten zu vergleichen und – wenn notwendig – zu modifizieren. Werden Niederschläge von höherer Jährlichkeit als 100 (z. B. 5.000) benötigt, so sind diese von den Hydrographischen Diensten der Länder und vom HZB auf Anfrage erhältlich.

Ein wichtiger Schritt bei der Festlegung des Bemessungsniederschlags ist die Wahl der Bezugsdauer. Kurzzeitige, in etwa der Konzentrationszeit entsprechende extreme Niederschlagsereignisse, liefern hohe Abflussspitzen mit kleinen Abflussfrachten. Länger andauernde extreme Niederschlagsereignisse liefern weniger hohe Abflussspitzen, jedoch hohe Abflussfrachten. Ein weiterer wichtiger Schritt ist die Wahl der Jährlichkeit. Für beide Aspekte wird auf Kapitel 5.3. verwiesen.

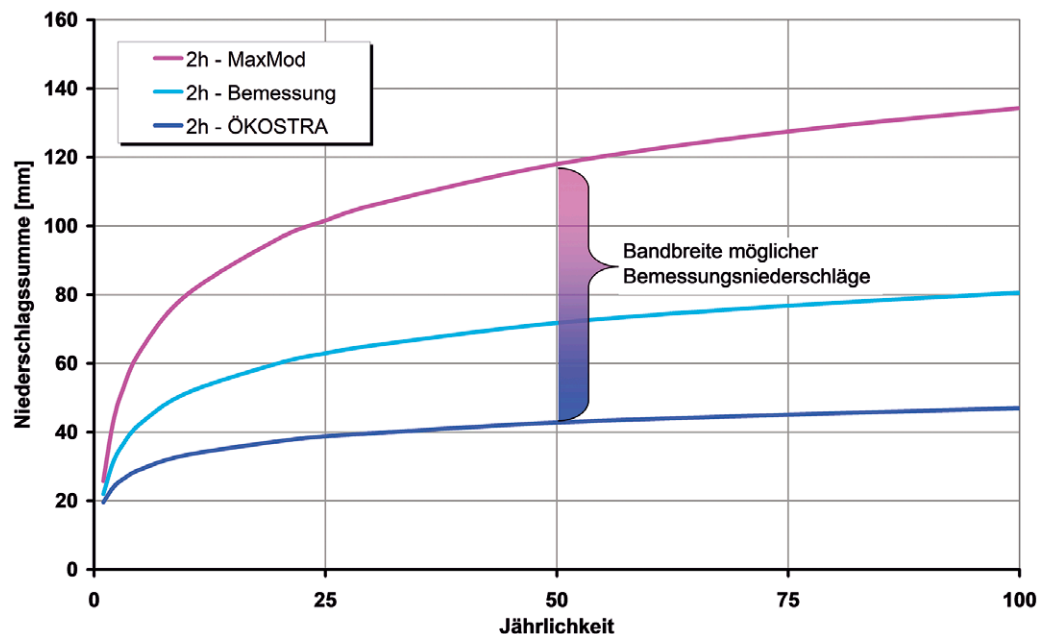


Abb. 2.12 Regenspendenlinien nach unterschiedlichen Methoden (ÖKOSTRA-, MaxModN- und gewichtete Bemessungsniederschläge) an einem Gitterpunkt für die Dauerstufe 2 Stunden

Als Alternative zu den Regenspendenlinien ist es möglich, lange Niederschlagszeitreihen zu simulieren, die dann als Eingangsgrößen in die Niederschlag-Abfluss-Modellierung dienen (Blöschl 2007; Rogger et al. 2011). Der Vorteil derartiger Monte Carlo-Methoden besteht darin, dass die Vorbefeuchtung und die Zusammenhänge der Jährlichkeiten von Niederschlag-Abfluss realistisch abgebildet werden können. Demgegenüber steht der Nachteil einer aufwendigeren Kalibrierung der Parameter des Niederschlagsmodells anhand von Niederschlagsdaten.

Tab. 2.2 Regenspendenlinien: eHYD Bemessungsniederschläge; MaxModN (obere Werte), gewichteter Bemessungsniederschlag (mittlere Werte) und ÖKOSTRA (untere Werte) für Villach; ohne Flächenabminderung für Jährlichkeiten von 1 bis 100 Jahren

Hydrographischer Dienst in Österreich

Bemessungsniederschlag (gewichtete Starkniederschlagsauswertung) h [mm]											
Auswertungsdatei: Villach											
Flächenabminderung: keine											
Bemessungsniederschlag mit MaxModN (oberen)- und ÖKOSTRA (unteren)-Werten											
Wiederkehrzeit (T)	1	2	3	5	10	20	25	30	50	75	100
Dauerstufe (D)											
5 Minuten	5.9	8.8	10.6	12.7	15.7	18.6	19.6	20.3	22.5	24.2	25.5
	6.2	8.6	10.1	11.9	14.5	16.9	17.7	18.3	20.2	21.6	22.7
	*6.6	8.4	9.5	10.9	12.9	14.7	15.3	15.8	17.3	18.3	19.1
10 Minuten	10.6	16.9	20.7	25.4	31.8	38.1	40.2	41.9	46.6	50.3	53.0
	9.6	14.1	16.7	20.0	24.5	29.0	30.5	31.7	35.0	37.6	39.5
	8.6	11.0	12.4	14.2	16.6	19.1	19.9	20.5	22.4	23.7	24.8
15 Minuten	13.6	22.2	27.2	33.5	42.1	50.7	53.5	55.7	62.0	67.1	70.7
	11.8	17.5	20.8	24.9	30.6	36.3	38.2	39.6	43.8	47.1	49.5
	10.1	12.8	14.4	16.4	19.1	22.0	22.9	23.6	25.6	27.2	28.4
20 Minuten	15.4	25.4	31.3	38.6	48.5	58.5	61.8	64.3	71.7	77.5	81.7
	13.2	19.6	23.4	28.0	34.4	40.7	42.8	44.5	49.2	52.9	55.6
	11.2	14.2	16.0	18.1	21.1	24.1	25.0	25.9	28.2	29.9	31.1
30 Minuten	18.2	30.3	37.3	46.2	58.2	70.2	74.0	77.2	86.1	93.2	98.1
	15.5	22.8	27.1	32.5	39.8	47.2	49.5	51.5	56.9	61.2	64.2
	13.1	16.4	18.4	20.7	24.0	27.4	28.5	29.4	31.9	33.8	35.1
45 Minuten	21.0	35.0	43.2	53.6	67.6	81.6	86.1	89.8	100.2	108.4	114.2
	17.9	26.0	30.8	36.9	45.1	53.2	55.8	58.1	64.1	69.0	72.3
	15.4	19.0	21.1	23.8	27.5	31.0	32.1	33.2	35.8	38.1	39.5
60 Minuten	22.9	38.4	47.4	58.8	74.3	89.7	94.7	98.8	110.2	119.2	125.7
	19.6	28.4	33.4	39.9	48.7	57.4	60.3	62.6	69.0	74.1	77.8
	17.1	21.1	23.2	26.1	29.9	33.7	35.1	36.0	38.8	41.0	42.6
90 Minuten	25.6	43.1	53.3	66.2	83.7	101.2	106.8	111.4	124.3	134.5	141.8
	22.2	31.7	37.2	44.3	53.7	63.1	66.1	68.6	75.6	81.1	85.1
	20.0	24.1	26.5	29.6	33.6	37.6	38.9	39.9	43.0	45.3	47.2

* - ÖKOSTRA-Wert ist größer/gleich dem MaxModN-Wert

() - Bemessungsniederschlag liegt am Rand oder außerhalb der Bandbreite

MaxModN - maximierte Modellniederschläge (HA0-Hydrologischer Atlas Österreichs (konvektives N-Modell); ALADIN-Vorhersagemodell

ÖKOSTRA - interpolierte extremwertstatistische Niederschlagsauswertungen (DVK124, modifiziert)

BOX 2.5 Bemessungsniederschläge – Höhe

Für den Regelfall wird die Verwendung von gewichteten Bemessungsniederschlägen (mittlere Werte) empfohlen, wie sie in eHYD zur Verfügung stehen. Es können jedoch in begründeten Fällen (z. B. durch Niederschlagsaufzeichnungen und Analysen bestätigt) die MaxMod-Niederschläge und die ÖKOSTRA-Werte Anwendung finden. Insbesondere in Kleinstzugsgebieten (< 1 km²) im alpinen Bereich können auch die MaxMod-Niederschläge verwendet werden, wenn Indizien dafür sprechen, dass sie den beobachteten Niederschlägen besser entsprechen als die gewichteten Bemessungsniederschläge, und in großen Gebieten (> 1.000 km²) ÖKOSTRA-Werte.

Zusätzlich wird die Auswertung von Niederschlagsaufzeichnungen im Einzugsgebiet empfohlen, um die lokalen Niederschlagsverhältnisse besser einschätzen zu können. In begründeten Fällen kann der Niederschlag erhöht bzw. reduziert werden, um den Einfluss von Schneeschmelze bzw. Schneefall zu berücksichtigen.

Betreffend Wahl der Jährlichkeit und Dauerstufe des Niederschlags wird auf Kapitel 5.3. verwiesen.

2.2.4. Zeitliche Verteilung des Ereignisniederschlags

Je nach der zeitlichen Verteilung der Ereignisniederschläge kann die simulierte Abflusswelle ganz unterschiedlich ausfallen. Im Regelfall resultiert aus einer anfangsbetonten Verteilung der niedrigste Abflussscheitelwert und aus einer endbetonten Verteilung der größte Abflussscheitelwert. Im DVWK-Merkblatt 113/1984 werden synthetische Verteilungen des Niederschlags empfohlen, die in vielen Computerprogrammen als Option angeboten werden (DVWK 1984). Die Niederschlagsintensitäten innerhalb eines Ereignisses ergeben sich demnach aus der zeitlichen Verteilung und der Niederschlagshöhe (Abb. 2.13). Typischerweise liegt bei anfangsbetontem Niederschlag ca. 70 % des Niederschlags in der ersten Hälfte. Analog liegt bei endbetontem Niederschlag ca. 70 % des Niederschlags in der zweiten Hälfte.

Da derartige synthetische Verteilungen in der Realität nie auftreten, wird hier empfohlen, die zeitliche Verteilung des Ereignisniederschlags entsprechend beobachteter Ereignisse zu wählen. Die beobachteten Niederschlagsintensitäten werden dabei so skaliert, dass sie in Summe über das Ereignis bzw. die Bezugsdauer die Bemessungsniederschlagshöhe ergeben. Dabei ist es wichtig, auf die bei den maßgebenden Ereignissen zu erwartenden Niederschlagstypen und ev. Zugrichtungen Bedacht zu nehmen (Abb. 2.14).

Wenn es aus lokalen Aufzeichnungen und aus der Fragestellung Hinweise dafür gibt, dass Doppelereignisse relevant sind (z. B. bei Retentionsbecken), sollten bei der Festlegung der zeitlichen Niederschlagsverteilung längere Niederschläge auch auf zwei kürzere Ereignisse aufgeteilt werden. Dabei sollten sowohl die Jährlichkeit der Einzelereignisse als auch die Jährlichkeit der Ereignissumme (bei entsprechend längerer Dauerstufe) der gewählten Jährlichkeit entsprechen.

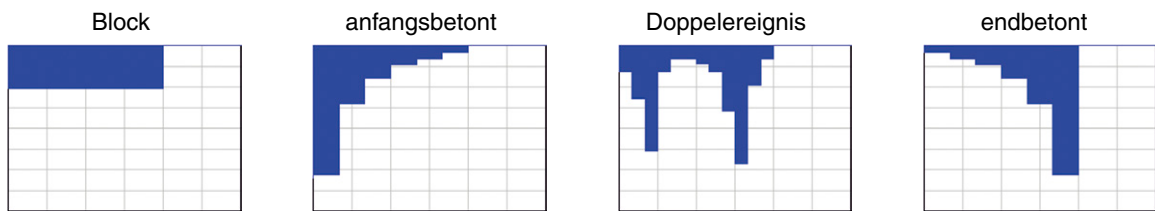


Abb. 2.13 Beispiele für synthetische zeitliche Niederschlagsverteilungstypen. Die horizontale Achse ist die dimensionslose Zeit (Prozent der gesamten Niederschlagsdauer), die vertikale Achse ist die Niederschlagsintensität

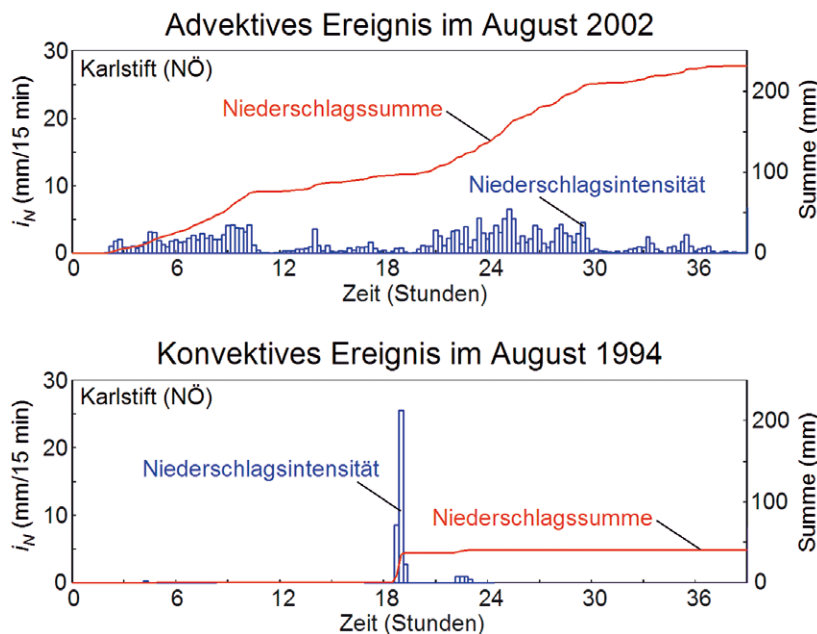


Abb. 2.14 Beispiele für beobachtete zeitliche Niederschlagsverteilungstypen im Waldviertel

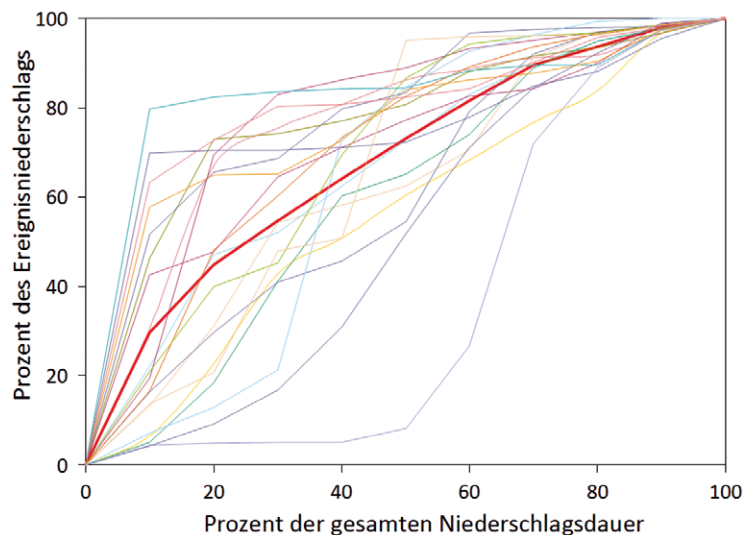


Abb. 2.15 Standardisierte mittlere zeitliche Niederschlagsverteilungen (dicke rote Linie) für die Station Tratzenbach (NÖ) für den 3-Stunden-Starkregen durch Auswertung von beobachteten Niederschlägen (dünne Linien) dieser Dauerstufen (Heilig 2012)

BOX 2.6: Zeitliche Verteilung des Ereignisniederschlags

Es wird empfohlen, die zeitlichen Verteilungen beobachteter Niederschlagsereignisse und mehrere synthetische Verteilungen des Niederschlags heranzuziehen, um damit den Einfluss auf die berechneten Abflüsse zu bewerten. Wenn es aus lokalen Aufzeichnungen und aus der Fragestellung Hinweise dafür gibt, dass Doppelereignisse relevant sind (z. B. bei Retentionsbecken), sollen bei der Festlegung der zeitlichen Niederschlagsverteilung längere Niederschläge auch auf zwei kürzere Ereignisse aufgeteilt werden.

2.2.5. Räumliche Verteilung des Niederschlags

Niederschlagsdaten werden in der Regel am Punkt gemessen. Für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung sind jedoch flächenbezogene Eingangsgrößen erforderlich, da alle Modelle auf der Wasserbilanzgleichung aufbauen. Es ist deshalb notwendig, auf Basis der Punktwerte Flächenwerte zu ermitteln. Dafür werden Methoden der hydrologischen Regionalisierung verwendet (Blöschl 1996a; Gutknecht 2006). Wegen der großen räumlichen Variabilität der hydrologischen Prozesse sind die berechneten Gebietswerte immer mit Unsicherheiten behaftet (Weilguni 2006). Um diese Unsicherheiten möglichst klein zu halten, ist die Wahl einer geeigneten Regionalisierungsmethode notwendig. Dafür stehen zwei Vorgangsweisen zur Verfügung:

- Abminderung des Bemessungsniederschlags am Punkt mit Flächenabminderungsfaktoren oder räumlichen Niederschlagsszenarien (zur Simulation von Bemessungsereignissen unter Verwendung von Regenspendenlinien);
- Räumliche Interpolation von Zeitreihen des Niederschlags an Stationen zur Bestimmung des Gebietsniederschlags (bei Verwendung beobachteter Niederschlagszeitreihen).

(a) Abminderung des Bemessungsniederschlags

Für die Ermittlung der Gebietsniederschläge bei Verwendung von Regenspendenlinien sind zwei Verfahren gebräuchlich: Flächenabminderungsfaktoren, die den Punktniederschlag N_p einer bestimmten Jährlichkeit in den entsprechenden mittleren Flächenniederschlag umrechnen, und Niederschlagsszenarien, die explizit eine räumliche Verteilung vorgeben.

Der Flächenabminderungsfaktor ARF (areal reduction factor) wird abhängig von der Einzugsgebietsfläche und von der Dauerstufe dargestellt. Im Berechnungstool des HZB für Bemessungsniederschlag

sungsniederschläge sind drei Arten der Flächenabminderungen zur Ermittlung der Bemessungsniederschläge integriert: (a) Sanfte Flächenabminderung – dauerstufenabhängig (Lorenz und Skoda 2002), (b) Sanfte – modifizierte Flächenabminderung – dauerstufenabhängig (Blöschl 2009), (c) Starke Flächenabminderung – intensitätsabhängig (Skoda et al. 2007). Die sanfte – modifizierte Flächenabminderung wird für den Regelfall empfohlen. Die Formel lautet:

$$N_G = N_P \cdot e^{-k \cdot A^{0,435}} \quad \text{mit} \quad k = 0,41 \cdot D^{-0,43}$$

wobei N_P der Punktniederschlag, N_G der Gebietsniederschlag (mm), A die Einzugsgebietsfläche (km^2) und D die Dauerstufe (min) sind. Wenn ein Einzugsgebiet beispielsweise die folgenden Kenngrößen hat: $A = 50 \text{ km}^2$, $D = 30 \text{ min}$, $N_{100} = 62,6 \text{ mm}$ ergibt sich als Gebietsniederschlag $N_G = 37,6 \text{ mm}$ und der Flächenabminderungsfaktor ist $ARF = N_G/N_P = 0,60$. Abb. 2.16 zeigt räumliche Abminderungsfaktoren nach Blöschl (2009), abhängig von der Einzugsgebietsgröße und der Dauerstufen des Niederschlagsereignisses. Das Produkt aus Punktniederschlag und Flächenabminderungsfaktor wird als räumlich konstante Niederschlagsverteilung angesetzt.

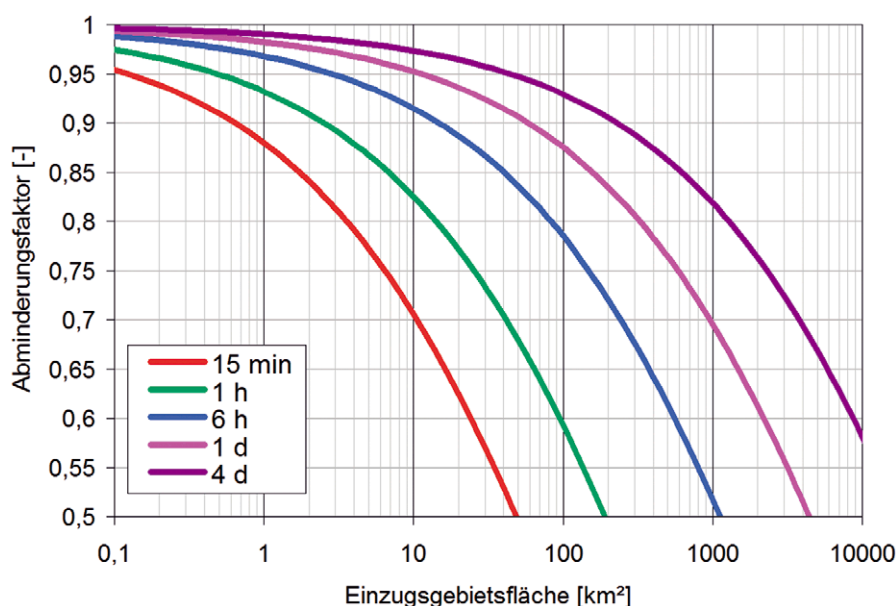


Abb. 2.16 Sanfte modifizierte räumliche Abminderungsfaktoren nach Blöschl (2009), abhängig von der Einzugsgebietsgröße und der Dauerstufe des Niederschlagsereignisses

Die räumliche Verteilung der Niederschläge hängt mit den Niederschlagsmechanismen zusammen. Konvektive Ereignisse sind meist kleinräumig verteilt mit Niederschlagzentren höherer Intensität, während synoptische (großräumige Niederschläge) meist eine gleichmäßigere Überregnung besitzen. Konvektive Niederschläge sind auch manchmal in synoptische Niederschlagsfelder eingelagert. Das in Abb. 2.17 gezeigte konvektive Ereignis über Teilen des Einzugsgebiets des Wölzerbaches führte am 7. Juli 2011 zu Rutschungen, murartigen Verlagerungsprozessen und Hochwasser. Die Schauerzelle im Mittellauf des Schöttl- und Hintereggerbaches erreichte ihre größte Intensität zwischen 15:00 und 16:00 MEZ. Die Abbildung zeigt die berechnete räumliche Verteilung der Niederschlagshöhe auf Basis der Rohdaten des naheliegenden Wetterradars am Zirbitzkogel. Die Profile durch die Schauerzelle weisen auf einen sehr kleinen räumlichen Abminderungsfaktor hin. Wenn derartige Ereignissituationen als relevant angesehen werden, kann in begründeten Fällen, insbesondere wenn MaxMod-Niederschläge verwendet werden, abweichend von Abb. 2.16 eine starke Flächenabminderung herangezogen werden.

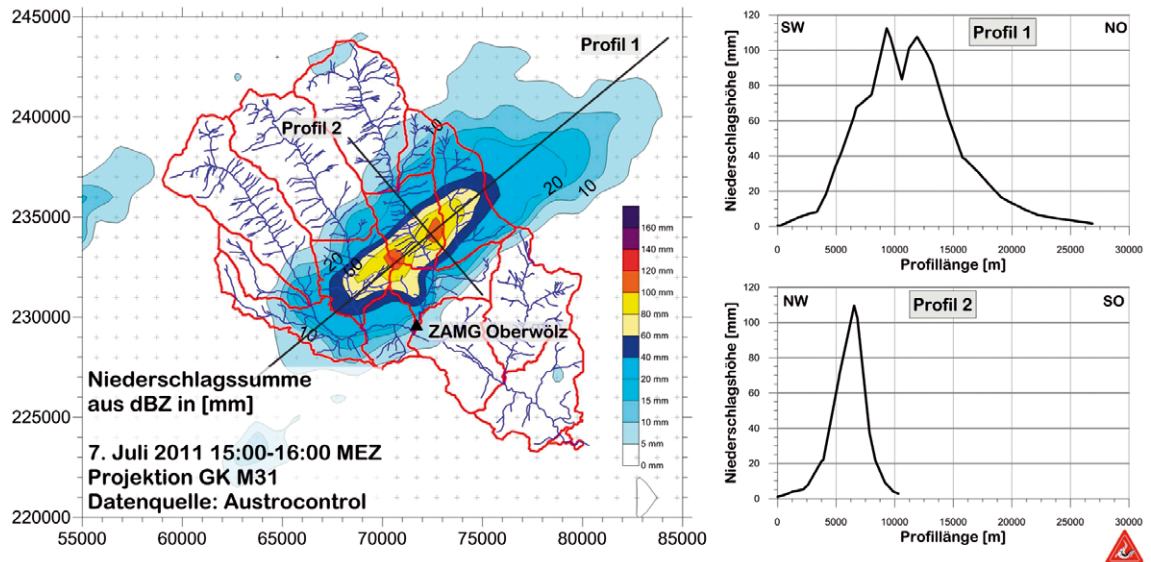


Abb. 2.17 Schauerzelle im Einzugsgebiet Wölzerbach: Beispiel eines extrem kleinräumigen Niederschlags. Links: Radarbild, rechts: Profile der Niederschlagshöhe (Hübl et al. 2012)

Die Wahl des Bemessungsniederschlags und der Flächenabminderung des Niederschlags ist auch im Zusammenhang mit möglichen relevanten Abflussszenarien bzw. den Ergebnissen von Abflussanalysen zu sehen. Ergänzend oder als Alternative zu den Flächenabminderungsfaktoren können Szenarien der räumlichen Verteilung des Niederschlags gewählt werden. Die Bildung dieser Szenarien soll von einem Verständnis maßgebender Niederschlagsmechanismen geleitet werden. Abb. 2.18 veranschaulicht unterschiedliche Abflussreaktionen für zwei räumlich verschiedene Regenzentren. Szenarien der räumlichen Verteilung des Niederschlags ergeben oft größere Abflüsse als eine räumlich konstante Verteilung mit Flächenabminderungsfaktor.

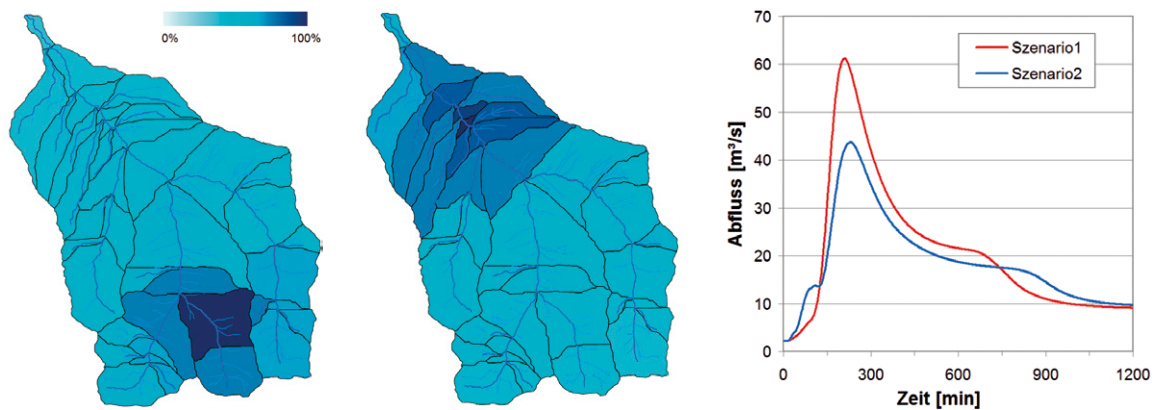


Abb. 2.18 Simulierte Abflussganglinien (rechts) für zwei unterschiedliche räumliche Niederschlagsverteilungen (links). Einzugsgebiet Weerbach, Modell ZEMOKOST, Bemessungsniederschläge Jährlichkeit = 100 Jahre. Ganz links Szenario 1: Regenschwerpunkt im hinteren Einzugsgebiet. Mitte links Szenario 2: Regenschwerpunkt im vorderen Einzugsgebiet. Szenario 1 ergibt einen höheren Abflussscheitel, da das hintere Einzugsgebiet die Flächen mit größerer Abflussbereitschaft (Almwiesen) besitzt

BOX 2.7: Flächenabminderung des Niederschlags

Für den Regelfall wird die Verwendung der sanften modifizierten räumlichen Abminderung des Niederschlags empfohlen. Es können jedoch in begründeten Fällen (z. B. durch Radar und Niederschlagsanalysen bestätigt) eine abweichende Abminderung bzw. eine räumlich differenzierte Verteilung des Niederschlags Anwendung finden.

(b) Räumliche Interpolation von Zeitreihen des Niederschlags an Stationen

Der Gebietsniederschlag kann aus den Punktdaten durch verschiedene Interpolationsmethoden berechnet werden. Bei deterministischen Methoden ist der zu interpolierende Wert (zu einem Zeitpunkt an einem Punkt im Gebiet) eine einzige Zahl, bei statistischen Methoden wird er als Zufallsvariable angesehen, die durch eine Verteilungsfunktion beschrieben wird. Als maßgebend wird dann meist der Mittelwert (zu einem Zeitpunkt an einem Punkt im Gebiet) dieser Verteilungsfunktion angesehen.

Zu deterministischen Methoden zählen:

- Thiessen-Methode: Der Gebietsniederschlag (zu einem Zeitpunkt) wird als gewichteter Mittelwert der Stationsniederschläge angesehen. Die Gewichte werden berechnet, indem die Streckensymmetralen der Positionen jeweils zweier Stationen verschnitten werden. Das Verhältnis der daraus entstehenden Teilflächen zur Gesamtfläche ergibt das Gewicht für jede Station. Die Methode liefert oft etwas ungenauere Ergebnisse als andere Verfahren.
- Distanzgewichtung: Der Niederschlag (zu einem Zeitpunkt an einem Punkt im Gebiet) wird als gewichteter Mittelwert der Stationsniederschläge angesehen. Die Gewichte für jede Station werden dabei als Funktion der Distanz zwischen der Station und dem jeweiligen Punkt gewählt, z. B. indirekt proportional zum Quadrat der Distanz. Die Methode kann unerwünschte Artefakte erzeugen, wenn Stationen nahe beisammen liegen.
- Spline-Interpolation: Der Niederschlag wird mittels stückweiser räumlicher Polynomfunktionen zwischen den Stationen interpoliert (Blöschl und Merz 2002). Diese Methode ist häufig in Softwarepaketen vorinstalliert.

Einige dieser Verfahren können mit Zusatzinformationen kombiniert werden, insbesondere mit der Seehöhe (Blöschl und Merz 2002).

Bei statistischen Interpolationsverfahren wird meist der Mittelwert der zu schätzenden Zufallsvariablen (zu einem Zeitpunkt an einem Punkt im Gebiet) für die Regionalisierung verwendet und die Varianz als Maß für die Güte der Schätzung. Zu statistischen Methoden zählen:

- Kriging-Interpolation: Der Niederschlag (zu einem Zeitpunkt an einem Punkt im Gebiet) wird als gewichteter Mittelwert der Stationsniederschläge angesehen. Die Gewichte für jede Station werden aus dem Variogramm des Niederschlags bestimmt. Das Variogramm gibt die Varianz des Niederschlags zwischen Punktepaaren in einem bestimmten Abstand an und beschreibt somit den räumlichen Zusammenhang der Daten. Es wird davon ausgegangen, dass der Zusammenhang der Daten nicht von der absoluten (geometrischen) Lage des Ortes abhängt, sondern nur von der relativen räumlichen Lage der betrachteten Orte zueinander (Distanz, Richtung).
- External Drift Kriging: Die Basis ist ähnlich wie die der Kriging-Interpolation. Zusätzlich wird angenommen, dass der Niederschlag perfekt mit einer Zusatzvariablen (z. B. Seehöhe) korreliert. Dadurch wird die räumliche Struktur der Zusatzvariablen dem interpolierten Niederschlag im Detail aufgeprägt. Ein Beispiel für die Verwendung der Zusatzinformation Seehöhe für die Regionalisierung des Jahresniederschlags in Osttirol zeigt Abb. 2.19. Das Bild links wurde mit Kriging-Interpolation ohne Zusatzinformation erstellt, während das Bild rechts mit External Drift Kriging erstellt wurde. Die wesentlich feinere Struktur des interpolierten Niederschlags ist offensichtlich.
- Georegression: In einem ersten Schritt wird eine Regression des Niederschlags mit der Zusatzvariablen (z. B. Seehöhe) aufgestellt. Mit der Regressionsgleichung wird dann für alle Punkte, an denen die Zusatzinformation vorhanden ist, der Niederschlag bestimmt. Dann wird die Differenz zwischen dem Messwert an einer Station und dem für diese Station mit der Regression berechneten Wert räumlich interpoliert (z. B. mit Kriging) und zum Wert der Regression addiert.

Für die Auswahl der Methode sind folgende Aspekte entscheidend, da sie die Qualität des flächendetaillierten Niederschlags bestimmen (in der Reihenfolge absteigender Bedeutung):

- (i) Die Güte der der Interpolation zugrunde liegenden Stationsdaten des Niederschlags und die Anzahl dieser Stationen.
- (ii) Der Umgang mit systematischen Interpolationsfehlern. Oft liegen mehr Talstationen als Bergstationen vor, und die Niederschläge in den Talstationen sind tendenziell geringer. Bei gleicher Gewichtung kann der Gebietsniederschlag erheblich unterschätzt werden.
- (iii) Die Auswahl der Zusatzinformation. Die Stationen sind oft weit voneinander entfernt. Die Zusatzinformation bestimmt das Verhalten der interpolierten Niederschläge zwischen den Stationen. Dafür ist es sinnvoll, Einflussgrößen wie z. B. die Orografie, den Niederschlagstyp, den Grad der räumlichen Gliederung des Geländes und die Niederschlagsdauer zu betrachten (Weilguni 2006).
- (iv) Die unabhängig von der Zusatzinformation gewählte Interpolationsmethode.

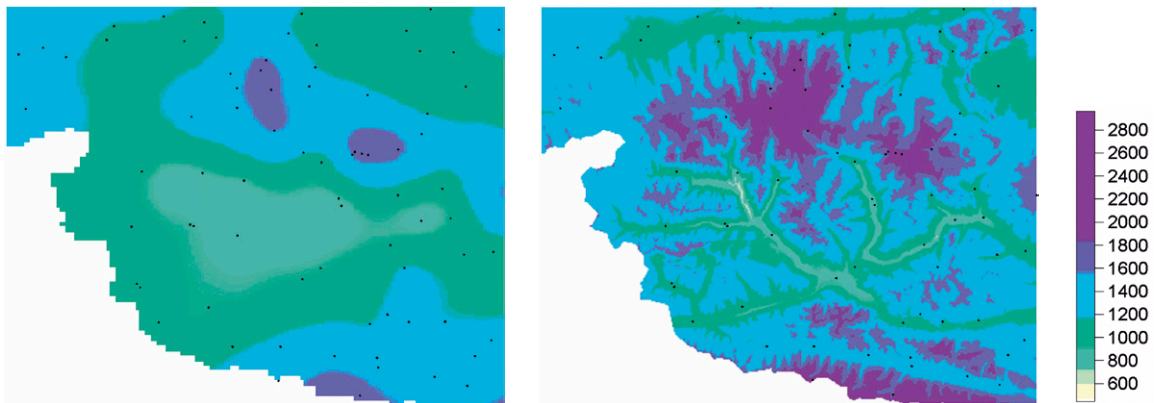


Abb. 2.19 Jahresniederschlagssumme (mm/a) ermittelt durch Interpolation von Stationsdaten für den Bereich Osttirol; links: Kriging-Interpolation ohne Zusatzinformation, rechts: External-Drift-Kriging unter Verwendung der Seehöhe als Zusatzinformation. Ausschnitt 100*80 km (Blöschl und Merz 2002)

Eine wichtige räumliche Information über den Niederschlag liefert das Wetterradar. Der Vorteil von Radardaten liegt in den flächigen Aussagen und darin, dass die Bewegung von Niederschlagsfeldern gut erkannt werden kann. Allerdings sind Radardaten mit einer Reihe von Unsicherheiten und Fehlern behaftet. In alpinen Gebieten kommt es zu Abschattungseffekten, wodurch die Niederschlagsfelder durch das Radar nicht gesehen werden. Zusätzliche Abschattungseffekte können durch vorgelagerte Niederschläge auftreten. Weiters wird die Reflektivität des Niederschlags gemessen, die nicht nur von der Niederschlagsintensität, sondern auch von anderen, unbekanntem Faktoren abhängt wie Aggregatzustand des Niederschlags (flüssig, fest) und Tropfengrößen.

Ein Beispiel für die Auswertung von Radardaten zeigt Abb. 2.20. Bei den Graphiken auf der linken Seite wurde eine Standardbeziehung $Z = 200 * R^{1,6}$ zwischen Reflektivität Z und Regenintensität R angewendet, wobei die Umrechnung in die Regenrate über Klassenmittelwerte von 14 Intensitätsstufen der Austrocontrol erfolgte. Bei den Grafiken auf der rechten Seite wurden die Rohdaten der Reflektivität für den untersten, mehr oder weniger horizontalen Elevationswinkel des Wetterradars am Zirbitzkogel verwendet, der weniger als 40 km entfernt ist. Im letzteren Fall ergeben sich Intensitäten von bis zu 5 mm pro Minute, der Gebietsniederschlag für das Gesamteinzugsgebiet reduziert sich jedoch um die Hälfte. Ein Vergleich mit der dokumentierten örtlichen Niederschlagsverteilung lässt die Ergebnisse der Rohdatenauswertung plausibel erscheinen.

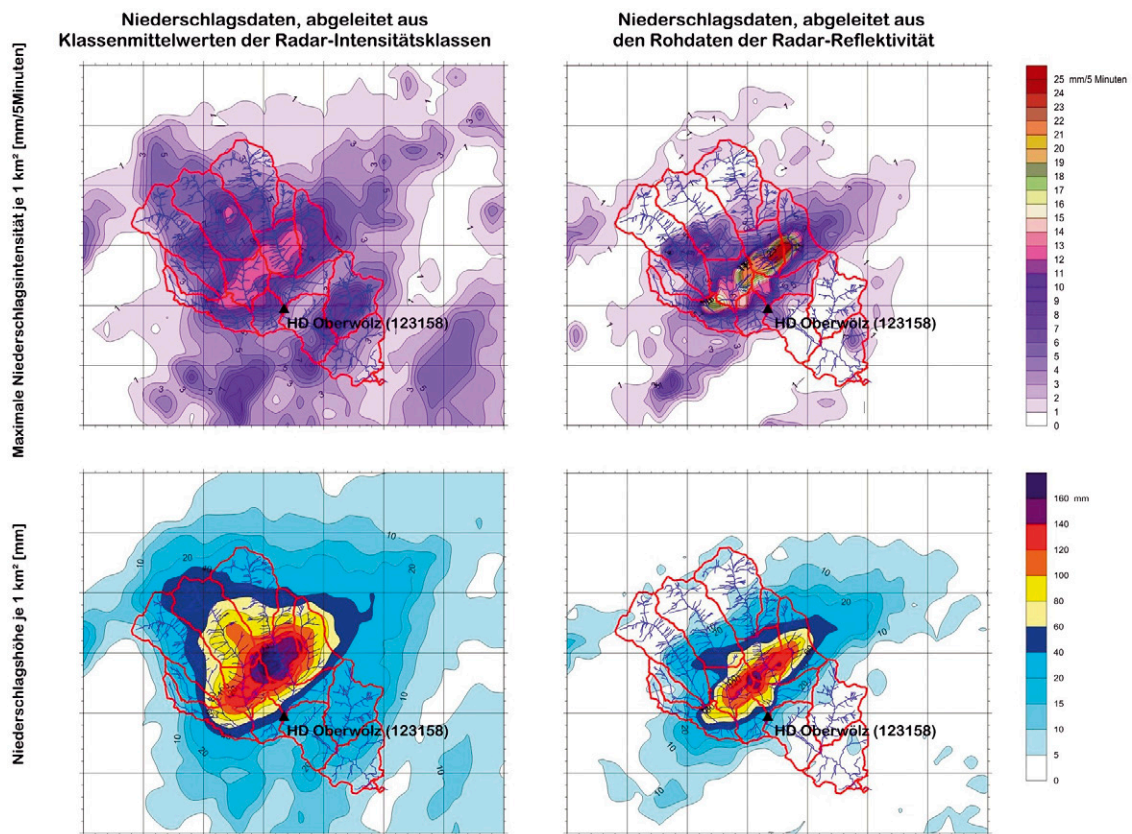


Abb. 2.20 Niederschlagsintensitäten für das Ereignis am 7. Juli 2011, 13 bis 17 Uhr im Einzugsgebiet Wölz-
bach, Steiermark, abgeleitet aus Radardaten der Austrocontrol. Oben: maximale Intensität in 5 Minuten. Unten:
gesamte Niederschlagshöhe. 1-km-Raster (Hübl et al. 2012)

Neben den im Einzelfall zu wählenden Methoden der Niederschlagsregionalisierung liegen für Österreich einige Fertigprodukte für flächige Niederschlagszeitreihen vor:

- INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis; Haiden et al. 2011): INCA ist ein Echtzeitsystem, d. h. es liefert Analysen und Prognosen mit den gerade zur Verfügung stehenden Daten, nur mit automatischer Qualitätsprüfung. Dabei werden die Stationsdaten des Niederschlags mit Wetterradardaten kombiniert. Die Stationsdaten bestimmen die Niederschlagsmengen, die Radardaten die räumlichen Muster zwischen den Stationen. Hauptanwendungsgebiete sind operationelle Vorhersagesysteme. Für den Zweck der Modellierung und Analyse von Ereignissen ist INCA nicht als Fertigprodukt vorhanden, hierfür sind eigene Nachrechnungen durch die ZAMG erforderlich.
- VERA (Vienna Enhanced Resolution Analysis; Steinacker et al. 2006): VERA ist ein Analyseverfahren meteorologischer Daten über komplexe Orografie. Als Zusatzinformationen fließt Vorwissen („Fingerprints“) über das kleinräumige räumliche Verhalten der Felder in die Analyse ein.

Fertigprodukte besitzen den Vorteil, dass sie unmittelbar als Eingangsgrößen in die Niederschlag-Abfluss-Modellierung herangezogen werden können. Das ist insbesondere für operationelle Anwendungen günstig. Die Interpolationsmethoden unter Verwendung von Radar (siehe oben) bzw. das Fingerprinting (Dorninger et al. 2008) sind mit Unsicherheiten behaftet. Außerdem sind Niederschlag-Abfluss-Modelle sehr sensitiv auf systematische Fehler des Niederschlags. Für die Entscheidung, Fertigprodukte zu verwenden, wird deshalb empfohlen zu prüfen:

- Welche Stationen im Untersuchungsgebiet sind konkret in das Niederschlagsprodukt eingeflossen?
- Wie wird mit systematischen Fehlern umgegangen?

Auch hier gilt, dass die Verwendung möglichst vieler (und guter) Niederschlagsstationen i. A. wichtiger ist als die Art der Interpolationsmethode. Oft kann eine einfachere Interpolation (bzw. Korrektur von systematischen Fehlern) zuverlässigere Gebietsniederschläge liefern, wenn eine größere Anzahl von Stationen verwendet wird.

BOX 2.8: Ermittlung des Gebietsniederschlags

Es wird empfohlen, (a) möglichst viele Bodenstationen des Niederschlags für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung heranzuziehen, einschließlich Tageswertstationen, auch wenn die Modellierung etwa für Stundenwerte erfolgt; und (b) aussagekräftige Zusatzinformation für die Interpolation zu verwenden. Der genaue Typ des Interpolationsverfahrens (deterministisch/statistisch) ist weniger wichtig als die Berücksichtigung der beiden oben genannten Kriterien.

Bei der Ermittlung von Jahreswerten des Niederschlags ist die Seehöhe eine empfohlene Zusatzinformation. Diese kann auch für Tageswerte sinnvoll sein. Bei Ereignisniederschlägen kann es sich als notwendig erweisen, Stau- und Aufgleiteffekte zu berücksichtigen. Für sehr kleine Gebiete (< 1 km²) empfiehlt es sich, eine repräsentative Station statt einer räumlichen Interpolation von Stationswerten zu verwenden, da die Interpolation Intensitätsspitzen reduziert.

Für Fertigprodukte des Niederschlags wird empfohlen, die Größe des systematischen Fehlers für unterschiedliche Zeitskalen mittels Stationsdaten zu prüfen, und auszuweisen, welche Stationen in die Erstellung des Fertigprodukts eingeflossen sind.

Niederschläge, die ausschließlich aus Radar abgeleitet wurden, sind meist in Hinblick auf die räumliche Verteilung aussagekräftig, jedoch weniger in Hinblick auf deren absolute Größe, und sollten deshalb nicht direkt für die Modellierung verwendet werden.

(c) Schneedaten im Gebiet

Schneedaten sind eine wichtige Information für die Kalibrierung und Validierung der Schneekomponente von Niederschlag-Abfluss-Modellen. Die Messung der Schneehöhe an Messstationen erfolgt mittels Schneepegel, Ultraschall- oder Radarsensoren (WKEV 2006) und Messungen im Gelände entlang definierter Linien (sog. Snow Courses) mittels Lawinensonden. Der Schneewasserwert der Schneedecke wird meist mittels Ausstechen und Wägen eines Zylinders bestimmt. Zudem existieren vereinzelt Schneekissen, die den Schneewasserwert kontinuierlich messen (z. B. Krajčič et al. 2017). Falls nur Schneehöhen vorhanden sind, ist für einen Vergleich mit dem durch das Niederschlag-Abfluss-Modell simulierten Schneewasserwert ein Schätzwert der Schneedichte erforderlich. Jonas et al. (2009) und Achleitner und Schöber (2017) geben dafür Algorithmen an, die auf Schneedichte-Messungen in der Schweiz bzw. in Österreich beruhen. Alternativ können nur die Zeitpunkte des Einschneiens und Ausaperns zwischen Modell und der Messung verglichen werden, wofür kein Schätzwert der Schneedichte notwendig ist.

Aus diesen Stationsdaten können durch Interpolation Gebietswerte abgeleitet werden. Dafür kommen z. B. Regressionen mit der Seehöhe zum Einsatz. Allerdings sind die Messungen der Schneehöhen wegen der sehr großen räumlichen Variabilität der Schneedecke oft nicht für das Gebiet repräsentativ. Zudem sind in Gipfelregionen wegen der Windexposition die Messungen fast immer durch Verblasen der Schneedecke verfälscht, wodurch große Unsicherheiten bei den Gebietswerten entstehen können. Deswegen werden oft räumliche Schneemuster als Alternative oder zur Ergänzung von Stationsdaten herangezogen. Diese können mit Fernerkundungsmethoden erhoben werden (Parajka et al. 2009), wie z. B. terrestrische Fotografie vom Gegenhang (Kirnbauer et al. 2009; Schöber et al. 2010; Parajka et al. 2012), Luftbilddaufnahmen von Flugzeugen bzw. Hubschraubern (Blöschl et al. 1991) und Satellitenaufnahmen (Parajka and Blöschl 2008b).

Die Fernerkundungsmethoden liefern in der Regel nur Informationen, ob bestimmte Gebietsteile schneebedeckt oder aper sind. Diese Schneebedeckungsmuster können dann mit der simulierten Schneebedeckung verglichen werden und liefern räumlich differenzierte Anhaltungspunkte über die Funktion des Schneemoduls des Niederschlag-Abfluss-Modells. Entsprechende Transformationen zwischen der Aufnahmegeometrie und der Kartengeometrie sind dafür notwendig. Zu den neuen Entwicklungen im Forschungsbereich zählt die flächendeckende Bestimmung der Schneehöhe mittels Laserscanning (Schöber 2014).

Für praktische Anwendungen bei der Niederschlag-Abfluss-Modellierung sind Satellitendaten eine besonders interessante Datenquelle, da keine zusätzlichen Messungen durchgeführt werden müssen. Eine Übersicht über Satellitendaten für die Schneehydrologie geben König et al. (2001). Insbesondere MODIS-Satellitendaten sind attraktiv, da sie mit einer Rasterweite von 500 m und durchschnittlich zwei Überflügen pro Tag vorliegen, kostenfrei erhältlich sind und für Österreich eine gute Genauigkeit aufweisen (Parajka and Blöschl 2012). Abb. 2.21 zeigt einen Vergleich der MODIS-Schneebedeckung mit räumlich interpolierten Schneehöhendaten. Für die Identifikation von Schnee wird bei MODIS eine Kombination der Kanäle im sichtbaren und im infraroten Wellenlängenbereich verwendet, was eine Unterscheidung von Wolken, welche die Erdoberfläche abschatten, und Schnee ermöglicht. Die Abschattung kann durch geeignete Methoden wesentlich reduziert werden (Parajka and Blöschl 2008a). Feiner aufgelöste Satellitendaten wie Landsat (30 m), Sentinel (20 m) oder Aster (bis zu 15 m) eignen sich auch zur Modellvalidierung in kleineren Einzugsgebieten, jedoch sind die Überflüge seltener (1 Woche oder länger). Die Wahl der Datenquellen sollte sich nach der erforderlichen räumlichen Auflösung richten, wobei mindesten 50 Pixel innerhalb des betrachteten Gebietes als Richtwert angegeben werden können.

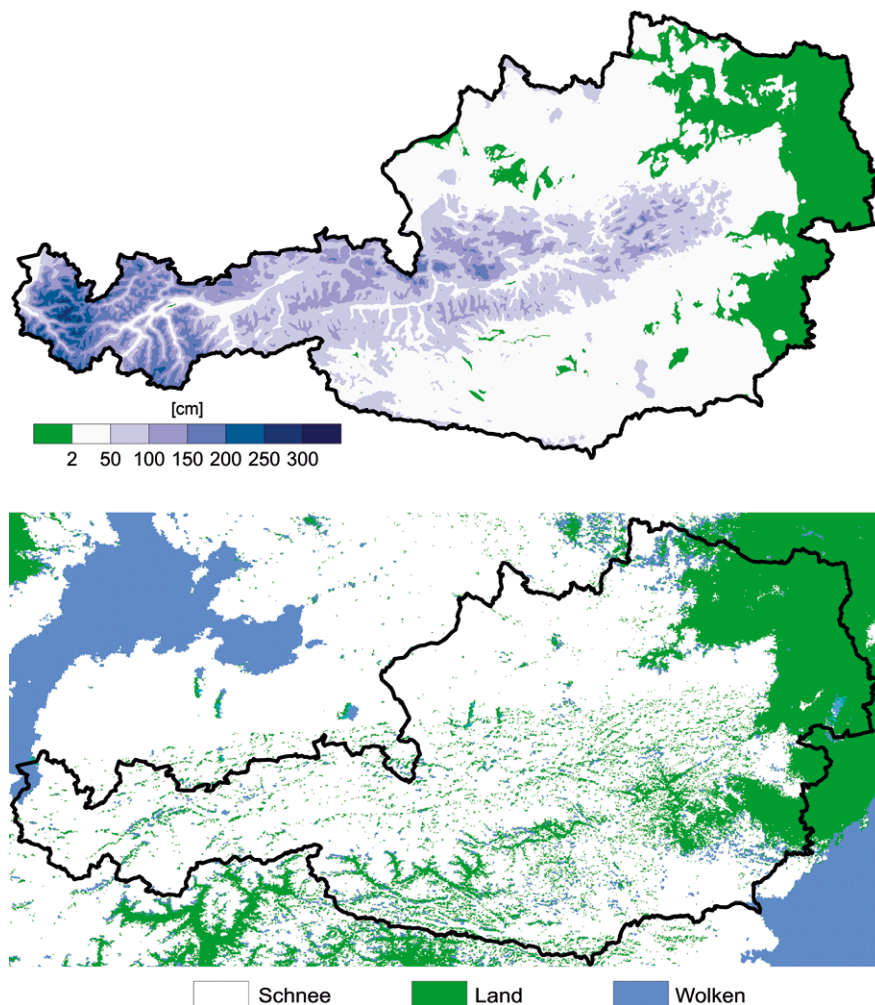


Abb. 2.21 Oben: aus Stationsdaten interpolierte Schneehöhen für den 23.2.2003; unten: MODIS-Schneebedeckung für den gleichen Termin (Parajka and Blöschl 2009)

(d) Gebietswerte der Lufttemperatur

Für viele Modellanwendungen ist es notwendig, die Temperaturverteilung in einem Gebiet in Abhängigkeit von der Seehöhe zu berücksichtigen, vor allem hinsichtlich der Entscheidung, ob der Niederschlag als Regen oder Schnee fällt, und bei der Modellierung der Schneeschmelze. In den meisten Fällen werden Gebietsmittel der Lufttemperatur für die Modellierung herangezogen, die aus Stationswerten interpoliert wurden. Die Interpolation kann als Mittelbildung oder Regression unter Berücksichtigung der Höhenverteilung im Gebiet erfolgen. Wegen lokaler Temperaturunterschiede können bei einer ungeprüften Regression jedoch physikalisch unplausible Werte des Temperaturgradienten berechnet werden. Deshalb wird empfohlen, auf physikalisch sinnvolle Werte zu achten. Die trockenadiabatische Temperaturabnahme (keine Kondensation) beträgt in guter Näherung $1\text{ °C pro }100\text{ m Höhe}$. Für den feuchtadiabatischen Temperaturgradienten wird meist ein mittlerer Wert von $0,6\text{ bis }0,7\text{ °C pro }100\text{ m}$ verwendet. Die Werte können entweder statt einer Seehöhenregression direkt in die Interpolation einfließen, oder als Grundlage für die Festlegung von minimalen und maximalen Seehöhengradienten dienen. Auch für die Lufttemperatur existieren Fertigprodukte, die mit verschiedenen Verfahren ermittelt wurden (z. B. Bica et al. 2007).

(e) Gebietswerte der Verdunstung

Die Verdunstung ist in den meisten Niederschlag-Abfluss-Modellen eine errechnete Größe, also nicht als Eingangsgröße erforderlich. Für die Plausibilisierung der Modellrechnungen können Verdunstungswerte dennoch in manchen Fällen sinnvoll sein. Zur Messung der potenziellen Verdunstung werden vom Hydrographischen Dienst Verdunstungswannen vom Typ GGI-3000 eingesetzt. Im Hydrographischen Jahrbuch von Österreich 2013 sind Daten von 38 Messstellen veröffentlicht. Darüber hinaus werden in Österreich an 31 Standorten Lysimeter betrieben (siehe www.lysimeter.at). Die Regionalisierung der Verdunstung lässt sich über mehrere, leichter regionalisierbare Kenngrößen durchführen, wie Lufttemperatur, Globalstrahlung, Luftfeuchte, Niederschlag oder Windgeschwindigkeit, wobei die zeitliche Auflösung unterschiedlich sein kann. Weiterführende Informationen finden sich in DVWK (1996), ATV-DVWK (2002) und DWA (2007) bzw. DWA (2016). Der Hydrologische Atlas von Österreich enthält flächenhafte Darstellungen der mittleren potenziellen Jahresverdunstung, berechnet nach der Penman-Methode (Karte 3.2, Dobesch 2003), und der mittleren jährlichen aktuellen Gebietsverdunstung aus der Wasserbilanz (Karte 3.3, Kling et al. 2005).

BOX 2.9: Räumliche Interpolation von Schneedaten, Lufttemperatur und Verdunstung

Es wird empfohlen, Fernerkundungsdaten der Schneebedeckung für die Plausibilisierung bzw. Validierung von Niederschlag-Abfluss-Modellen zu verwenden, sofern Schneeprozesse simuliert werden. Die Wahl der Fernerkundungsdaten sollte sich dabei nach deren Genauigkeit und der erforderlichen räumlichen Auflösung richten.

Stationsdaten der Schneehöhe und des Schneewasserwerts sind oft räumlich nicht repräsentativ, sollten aber dennoch für einen überschlägigen Vergleich herangezogen werden. Die Zuverlässigkeit der Messdaten sollte dabei bedacht werden.

Es wird empfohlen, für die Bildung von Gebietsmitteln der Lufttemperatur die Höhenverteilung im Gebiet zu berücksichtigen und auf physikalisch sinnvolle Werte zu achten.

In manchen Fällen kann eine Plausibilisierung kontinuierlicher Niederschlag-Abfluss-Modelle mittels Messungen oder Berechnungswerten der Verdunstung sinnvoll sein.

2.2.6. Niederschlags-Prognosen und Klimawandel

Zur Verlängerung der Vorhersagefrist von operationellen Abflussprognosen werden heute vielfach Prognosen von Niederschlag und Lufttemperatur als Eingangsgrößen in die Niederschlag-Abfluss-Modellierung herangezogen. In Österreich werden derzeit die Prognosen des INCA-Systems der ZAMG verwendet (Haiden et al. 2011). Die Niederschlagsprognosen werden dabei aus zwei Komponenten ermittelt. Die erste Komponente beinhaltet eine Niederschlagsanalyse für den aktuellen Zeitpunkt und eine Extrapolation der Bewegungsrichtungen der beobachteten Niederschlagsfelder unter Zuhilfenahme von Radardaten (Nowcasting). Die zweite Komponente ist eine Kombination der Prognosen der numerischen Wettermodelle ALARO, AROME (Application of Research to Operations at MEscale) und ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Wenn sich die Methode der Niederschlagsanalysen zur Erstellung derartiger Fertigprodukte ändert, ist es wichtig, das Abflussmodell nachzukalibrieren, da sonst große systematische Fehler des prognostizierten Abflusses auftreten können.

Die Unsicherheit von derartigen Prognosen kann durch Vergleiche mit dem beobachteten Abfluss bestimmt werden. Diese Vergleiche sollten der Art der Prognose entsprechen. Sind beispielsweise Hochwässer von Interesse, sind nur Hochwasserereignisse auszuwerten; Entsprechendes gilt für Niederwässer. Je nach hydrologischer Situation können sich die Unsicherheiten wesentlich unterscheiden. Ebenso ist es sinnvoll, die Fehler der Niederschlagsprognose von den Fehlern des Abflussmodells zu unterscheiden (siehe z. B. Nester et al. 2012 sowie Kapitel 6.1.1.). Datenausfälle bzw. Übertragungsfehler sind im Echtzeitfall sehr relevant und sollten durch redundante Auslegung des Gesamtsystems möglichst hintangehalten werden.

Um den Grad der Prognoseunsicherheit auch in Echtzeit zu quantifizieren, werden vermehrt Ensemblevorhersagen verwendet (z. B. Komma et al. 2006a). Als Ensemble wird dabei das Kollektiv einer Vielzahl unterschiedlicher Prognoseläufe bezeichnet, welche alle als gleich wahrscheinlich angenommen werden. Die verschiedenen möglichen Niederschlagsfelder werden als Eingangsgrößen in ein Niederschlag-Abfluss-Modell verwendet. Das Ergebnis ist ein Ensemble von Abflussvorhersagen. Die Breite des vom Ensemble aufgespannten Streubereichs dient dann zur Beschreibung der Unsicherheit der Vorhersagen (Nester et al. 2012). Abb. 2.22 zeigt ein Beispiel für Ensembleprognosen des Niederschlags (links) und des damit berechneten Abflusses (rechts). Mit zunehmender Prognosefrist wird der Streubereich des Ensembles größer, da die Unsicherheiten zunehmen. Bei der Interpretation derartiger Abflussprognosen ist zu beachten, dass der Streubereich ein Indikator für die Unsicherheit ist, künftige Beobachtungsdaten aber (mit geringer Wahrscheinlichkeit) auch außerhalb des Streubereiches liegen können. Es sind auch saisonale Prognosen möglich, allerdings ist die Genauigkeit wesentlich geringer (z. B. Wetterhall et al. 2017).

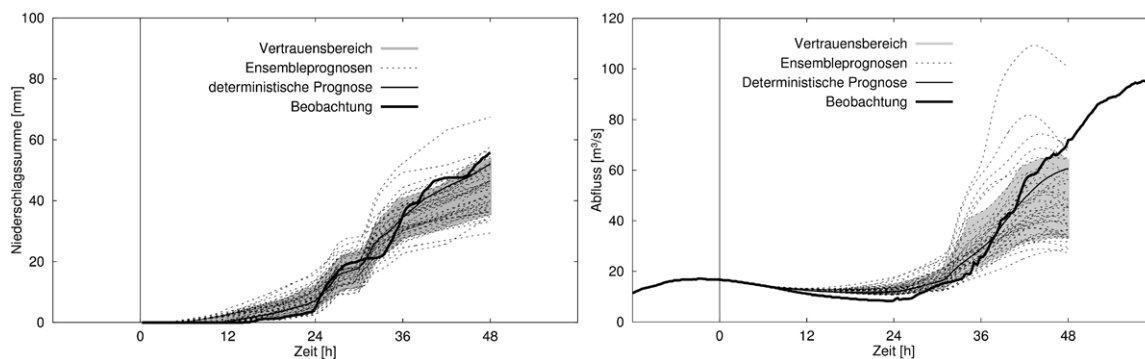


Abb. 2.22 Beispiel von Ensembleprognosen des Niederschlags (links) und des Abflusses (rechts) nach Input in ein Niederschlag-Abfluss-Modell für den Kamp bei Zwettl (Komma et al. 2006a)

Im Gegensatz zu meteorologischen Vorhersagen, bei denen das Wetter über einen Zeitraum von bis zu ca. 10 Tagen vorausgesagt wird, reichen Klimaprojektionen über einen wesentlich längeren Zeitraum von Jahrzehnten bis Jahrhunderten. Dabei wird nicht das Wetter vorausgesagt, sondern das mögliche Klima, d. h. die mittleren Verhältnisse über einen längeren Zeitraum. Mögliche Auswirkungen eines geänderten Klimas auf den Abfluss werden meist mittels Szenarienanalysen durchgeführt (Blöschl et al. 2011, 2017). Ausgangspunkt sind bestimmte Annahmen über zukünftige CO₂-Emissionen, mit denen globale Klimamodelle betrieben werden (IPCC 2013). Wegen der groben räumlichen Auflösung (> 100 km) werden die Ergebnisse der globalen Modelle mittels Downscaling-Verfahren auf ein kleineres Bezugsraster gebracht, entweder mittels statistischer Methoden oder mittels regionaler Klimamodelle (Schöner et al. 2011). Die so ermittelten Niederschläge und Lufttemperaturen dienen dann als Eingangsgrößen in Niederschlag-Abfluss-Modelle. Auswertungen werden dann in weiterer Folge entweder für den gesamten Zeitraum oder für ausgewählte Perioden (sogenannte Zeitscheiben) durchgeführt. Diese sollten eine Länge von mindestens 30 Jahren aufweisen, um eine repräsentative statistische Auswertung durchführen zu können.

Eine der Schwierigkeiten dieser Vorgangsweise besteht darin, dass sich die mit den Klimamodellen berechneten Niederschläge in der Regel stark von den beobachteten Niederschlägen unterscheiden. Um die systematischen Fehler auszugleichen, können sogenannte Bias-Korrekturen durchgeführt werden, bei denen die Ergebnisse so transformiert werden, dass etwa der Mittelwert und die Standardabweichung mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen. Alternativ kann der sogenannte Delta-change-Ansatz angewandt werden, bei dem die Differenz der mit dem Klimamodell berechneten Niederschläge zwischen einem Zeitraum der Vergangenheit und der Zukunft zu den beobachteten Niederschlägen addiert wird. Auch sorgfältig geprüfte und Bias-korrigierte Ergebnisse von Klimamodellrechnungen sind jedoch mit großen Modellunsicherheiten behaftet, die weit über denen anderer Anwendungen von Niederschlag-Abfluss-Modellen liegen können. Ein Teil dieser Unsicherheiten kann durch Ensembleläufe von Klimamodellen abgeschätzt werden, bei denen die Streuung zwischen den einzelnen Läufen als Maß für die Unsicherheit angesehen wird (grauer Bereich in Abb. 2.23). Allerdings werden dadurch nicht die systematischen Fehler des Klimamodells abgebildet. Auch die Parameter des Niederschlags-Abflussmodells können sich zeitlich ändern (Merz et al. 2011). Insgesamt ist deshalb bei der Interpretation von Klimaszenarien bei der Niederschlag-Abfluss-Modellierung große Vorsicht geboten. Für wasserwirtschaftliche Entscheidungen sollten sie deshalb als Zusatzinformation und nicht als tragende Information herangezogen werden (siehe Blöschl et al. 2011, 2018).

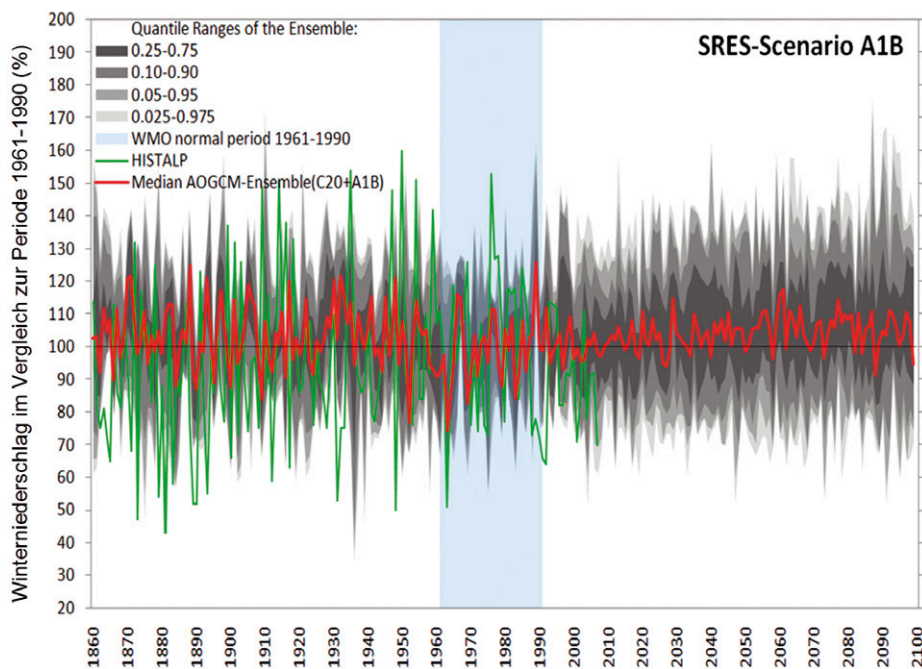


Abb. 2.23 Winterniederschläge (Dezember, Jänner, Februar) im Alpenraum von 1860 bis 2100, bezogen auf die Periode 1960 – 1990. Die rote Linie mit grauem Streubereich ist das Ergebnis von 15 globalen Ozean-Atmosphären-Modellen für ein bestimmtes Szenario. Die grüne Linie zeigt die Niederschläge aus Stationsdaten (aus: Schöner et al. 2011)

BOX 2.10: Meteorologische Prognosen und Klimaszenarien

Bei der Interpretation von operationellen Abflussprognosen ist es sinnvoll, die verschiedenen Fehlerquellen (Übertragungsfehler der Eingangsdaten bzw. Ausfälle, Fehler der Niederschlagsprognosen, Abflussmodellfehler) zu unterscheiden und zu bewerten. Auswertungen von Vergleichen zwischen beobachtetem Abfluss und Ensembleprognosen können dabei eine Hilfestellung geben.

Die Unsicherheiten von Klimaszenarien können weit über denen anderer Anwendungen von Niederschlag-Abfluss-Modellen liegen. Deshalb ist bei der Interpretation große Vorsicht geboten. Für wasserwirtschaftliche Entscheidungen sollten sie als Zusatzinformation und nicht als tragende Information herangezogen werden.

2.3. Abfluss

2.3.1. Erhebung und Auswahl von Stationsdaten

Der Abfluss wird an Pegeln ermittelt (Abb. 2.24). Dafür wird der Wasserstand mit hoher zeitlicher Auflösung (kleiner als 1 Stunde) aufgezeichnet und dann mittels Wasserstands-Durchflussbeziehungen (Pegelschlüssel) in den Abfluss umgerechnet. Der Hydrographische Dienst in Österreich (inkl. via donau Wasserstraßen GesmbH) betreibt derzeit (Stand 2018) etwa 900 Pegelstationen und erhält Daten von ca. 450 Stationen anderer Betreiber, z. B. von Kraftwerksgesellschaften (Abb. 2.25). Die Messstellen sind heute bis auf wenige Ausnahmen mit Registriergeräten ausgestattet, die eine Aufzeichnung des Wasserstandes in dieser hohen zeitlichen Auflösung erlauben. Die Hälfte der Pegeleinzugsgebiete ist größer als 120 km².

Häufig müssen Niederschlag-Abfluss-Modelle in kleinen Gebieten angewendet werden, in denen kein Pegel vorhanden ist (unbeobachtete Einzugsgebiete). Für diese Gebiete sind Daten von nahe gelegenen, hydrologisch ähnlichen Gebieten heranzuziehen oder die Daten direkt zu erheben. Das kann durch Gebietsbegehungen, die Einrichtung von zeitweiligen Messstellen bzw. die Durchführung von Messkampagnen im Gebiet erfolgen. Eine Verknüpfung mit

längeren Beobachtungsreihen vergleichbarer Gebiete zur Plausibilisierung sollte dabei vorgenommen werden. Kriterien für die Auswahl der Pegelstationen außerhalb des Einzugsgebiets sind: hydrologische Ähnlichkeit (Entfernung zum Gebiet, Geologie, Niederschlagsverteilung, Höhenlage), Datenqualität und Verfügbarkeit, z. B. Reihenzahl, Genauigkeit.

Auch Informationen, die nicht in Zahlenform vorliegen, sollten genutzt werden, wie Informationen aus Chroniken, visuelle Beobachtungen Ortsansässiger und Wasserspiegelanschlaglinien (siehe dazu auch Kapitel 4.5. und 5.2.). Informationen über historische Hochwässer, die vor Beginn von Pegelmessungen aufgetreten sind, können unter anderem aus Chroniken, Steuerunterlagen, Zeitungsberichten und Hochwassermarken rekonstruiert werden und sind für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung von Hochwässern interessant (Hall et al. 2014).



Abb. 2.24 Beispiel einer Pegelstation: Unterwindau/Windauer Ache, Tirol (Foto: HD Tirol)

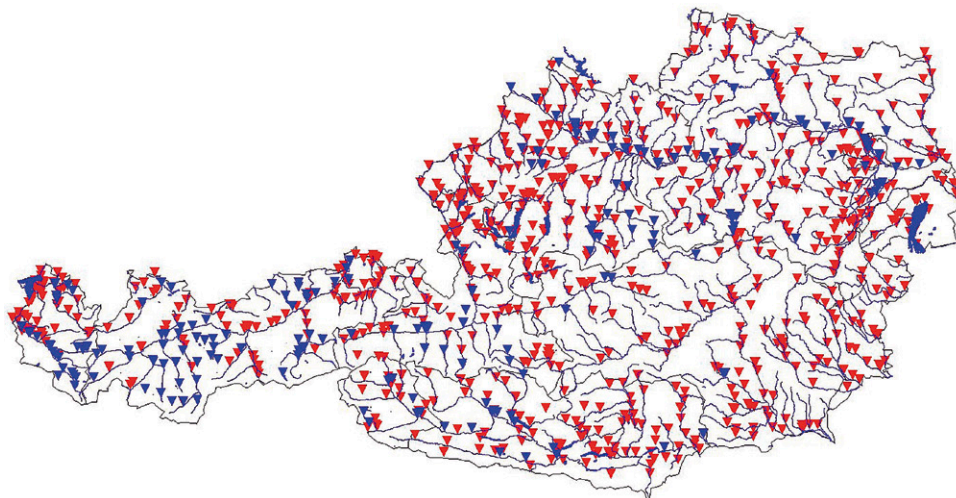


Abb. 2.25 Pegelstationen des Hydrographischen Dienstes sowie anderer Betreiber, von denen der Hydrographische Dienst Daten erhält. Rot: Hydrographischer Dienst inkl. via donau, Blau: Pegelstationen anderer Betreiber

BOX 2.11: Auswahl der Abflussdaten

Grundsätzlich sollten möglichst alle verfügbaren Abflussdaten im zu modellierenden Gebiet verwendet werden. Empfohlen wird eine umfassende Datenerhebung, wobei Datenqualität und Historie beachtet werden sollten. Für Gebiete ohne Abflussdaten sind Abflussdaten aus nahe gelegenen, hydrologisch ähnlichen Gebieten heranzuziehen. Empfehlenswert ist auch die Erhebung von Zusatzinformationen, z. B. aus Ereignisdokumentationen, Chroniken, Projektberichten, berechneten oder geschätzten hydrologischen Werten. Diese Zusatzinformationen haben besonders bei der Modellierung von Gebieten ohne Abflussdaten einen hohen Stellenwert.

2.3.2. Datenprüfung und Korrektur

Abflussdaten werden in Österreich vom Hydrographischen Dienst und anderen, oft privaten Messstellenbetreibern, z. B. Kraftwerksgesellschaften, nach Richtlinien (z. B. Pegelordnung, BMLFUW 2007a) erhoben. Dennoch sind wegen der Schwierigkeit des Messprozesses gewisse Ungenauigkeiten bzw. Fehler nicht auszuschließen. Abb. 2.26 zeigt einige mögliche Beeinflussungen von Abflussmessungen. Deshalb unterzieht der Hydrographische Dienst in Österreich die Daten seines Messnetzes einer umfangreichen Qualitätskontrolle und stellt geprüfte und korrigierte Daten zur Verfügung.

Die Qualitätsprüfung umfasst die Ergänzung fehlender Daten und die Korrektur fehlerhafter Daten (Mess-, Aufzeichnungs-, Geräte-, Eingabefehler) sowie die Prüfung auf Plausibilität mithilfe visueller und rechnerischer Methoden (Müller 2006). Korrigierte Daten werden als solche gekennzeichnet. Zu möglichen Beeinflussungen der gemessenen Daten (z. B. durch Eis, Verkräutung oder Trockenfallen) oder Besonderheiten der Messstelle (z. B. Verlegung, Bauarbeiten, Pegelnullpunkts- oder Profiländerungen, besondere Vorkommnisse wie Lawinen o. a.) werden Anmerkungen bzw. Fußnoten im Hydrographischen Jahrbuch von Österreich angeführt. Der Umfang der Datenprüfung ist nicht bei allen Pegeln gleich. Deshalb sollten grundsätzlich alle Daten mit Aufmerksamkeit verwendet und Zusatzinformationen vom Messstellenbetreiber eingeholt werden. Rohdaten und Daten anderer Betreiber sollten grundsätzlich geprüft werden. Wenn eine Korrektur erforderlich ist, sollte diese durchgeführt und begründet werden.



Abb. 2.26 Beeinflussungen von Abflussmessungen: (a) durch Kraftwerke, Einleitungen, Ausleitungen, Wasserfassungen – Uttendorf/Stubache, Salzburg: Einleitung KW-Kanal oberhalb der Messstelle (Foto: G. Müller, Juli 2010), (b) durch Eis – Pegel Tamsweg/Taurach, Salzburg (Foto: HD Salzburg, 8.1.2002), (c) durch Verkräutung – Untereching/Pladenbach, Salzburg (Foto: G. Müller)

Wie beim Niederschlag erfolgt die Prüfung bzw. Korrektur in mehreren Schritten:

(a) *Prüfung der Wasserstandsdaten auf Fehlwerte (Lücken) und fehlerhafte Werte (Geräte-, Aufzeichnungs-, Mess-, Eingabefehler):* Messfehler und Datenausfall können z. B. auf Hängenbleiben des Schwimmers, Verschlammen, Einfrieren des Pegels im Winter, Drift bei Drucksonden oder Stromausfall zurückzuführen sein. In einem ersten Schritt werden deshalb die Wasserstandsdaten grafisch dargestellt und hinsichtlich Lücken und fehlerhafter Werte überprüft. Zum Vergleich werden die regelmäßigen Kontrollablesungen des Wasserstands (Lattenpegelablesungen), der mittlere Jahresverlauf an der Messstelle (typischer Jahresgang) sowie Daten von Nachbarstationen herangezogen. Vor allem bei Hochwässern dienen die Wasserpegelanschlagslinien, nach dem Ereignis durch Begehungen aufgenommen, als Orientierung. Weitere Messwerte, z. B. Niederschlag, Luft- und Wassertemperatur oder Zusatzinformationen aus Mess- und Begehungsprotokollen dienen ebenfalls dem Auffinden von Fehlern und der Plausibilisierung des Wasserstandsverlaufs. Fehlerhafte Werte werden korrigiert.

Die Füllung von Datenlücken erfolgt auf Basis der Kontrollmessungen des Wasserstands sowie entweder mithilfe von Daten einer redundanten Wasserstandsaufzeichnung durch einen zweiten Sensor oder Daten benachbarter Messstellen, indem über Regressionsbeziehung zwischen beiden Datenreihen eine Ersatz-Datenreihe erzeugt und eingefügt wird (Rekonstruktion).

Abb. 2.27a zeigt ein Beispiel für die Rekonstruktion fehlender Daten (Lückenfüllung). Die Lücke in den Wasserstandsdaten einer Station (schwarze Linie) wurde mithilfe der vollständigen Datenreihe einer benachbarten Station (blaue Linie) gefüllt. Aus der Regressionsbeziehung zwischen beiden für überlappende Zeiträume wird eine Ersatzganglinie für die Datenlücke rekonstruiert und eingefügt (rote punktierte Linie). Abb. 2.27b verdeutlicht, wie eine fehlerhafte Ganglinie (schwarze Linie) an die Kontrollablesungen (blaue Punktwerte) und Kontrollmessungen (grüner Punktwert) angepasst wird. Das Ergebnis ist die rote Ganglinie. Abb. 2.27c zeigt die Korrektur von durch Eis beeinflussten Wasserstandsaufzeichnungen. Die schwarzen Wellen in der Abbildung sind nicht real, sondern auf die Eisbildung zurückzuführen. Die rote Linie ist die mithilfe von Kontrollmessungen korrigierte Ganglinie. Zur Plausibilisierung, ob eine Eisbeeinflussung vorliegen kann, werden auch Lufttemperatur oder Wassertemperatur herangezogen.

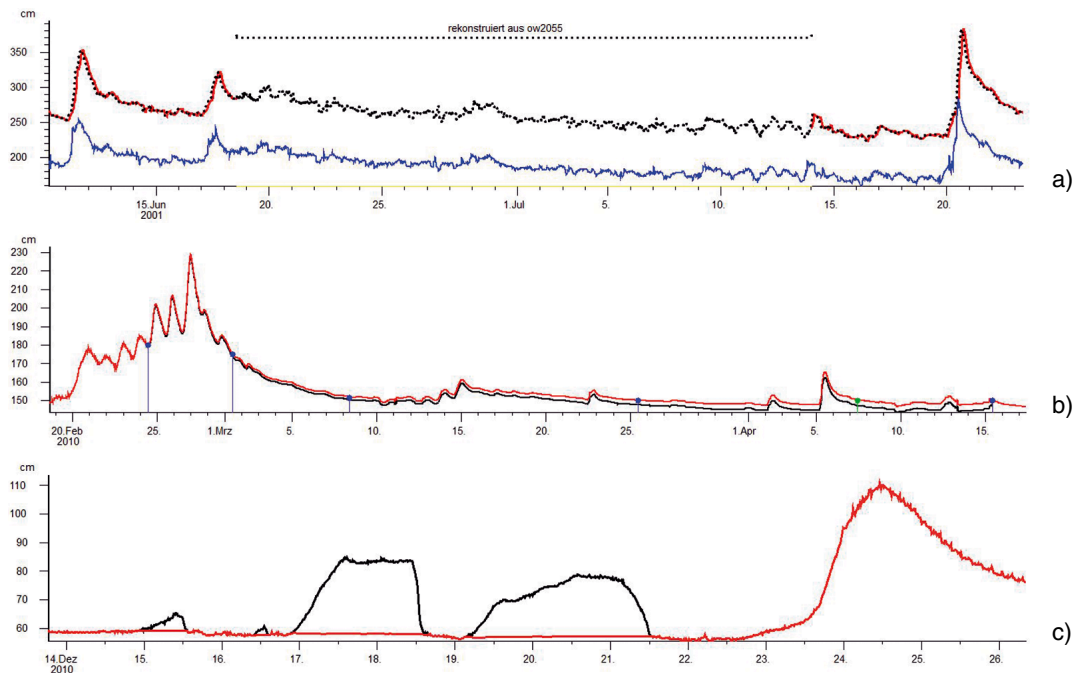


Abb. 2.27 (a) Rekonstruktion fehlender Wasserstandsdaten mittels eines Vergleichspegels, (b) Korrektur (rot) fehlerhafter Wasserstände (schwarz) mithilfe von Kontrollablesungen (blaue Punkte) und Messungen (grüner Punkt), (c) Korrektur (rot) von durch Eis beeinflussten Wasserständen (schwarz)

(b) Prüfung der Abflussdaten im Vergleich zu Nachbarpegeln (Bilanzierung) und anderen Informationen (Plausibilisierung): Als zweiter Schritt werden die aus den Wasserstandsdaten mithilfe von Wasserstands-Durchfluss-Beziehungen abgeleiteten Abflüsse in Hinblick auf systematische Fehler überprüft. Dies erfolgt mittels Abflussbilanzierung von Oberlieger, Unterlieger und Zubringer. Dabei werden die Abflussspenden für die einzelnen Pegel-Einzugsgebiete sowie das Zwischeneinzugsgebiet berechnet und verglichen. Sie sollten im regionalen Trend liegen bzw. Unterschiede sollten erklärbar sein, z. B. aus Gebietseigenschaften, Witterungsverlauf oder anthropogener Beeinflussung. Besonders im Hochwasserfall ist die Bilanzierung wichtig, da bei großen Durchflüssen die Wasserstands-Durchfluss-Beziehungen ungenauer sind.

Abb. 2.28 zeigt ein Beispiel für den oberen Lech. Zu Beginn des Zeitraums hat das Zwischengebiet höhere Spenden als das Oberlieger-Einzugsgebiet Lech, obwohl dessen Fläche kleiner ist. In den hochalpinen Bereichen hat jedoch die Schneeschmelze noch nicht voll eingesetzt. Das geschieht erst Ende April, der Anteil des Oberlieger-Einzugsgebietes am Abfluss des Gesamtgebietes Steeg nimmt deutlich zu. Die höchsten Spenden kommen nun aus dem hoch gelegenen und flächenmäßig kleinsten Gebiet. Gut sichtbar sind auch die Auswirkungen eines Kaltlufteinbruchs zwischen 15. und 20. Mai. Die Schmelze kommt in der Höhe zum Stillstand, die Spenden des Oberliegergebietes gehen zurück. Sie steigen mit erneutem Einsetzen der Schmelze wieder an.

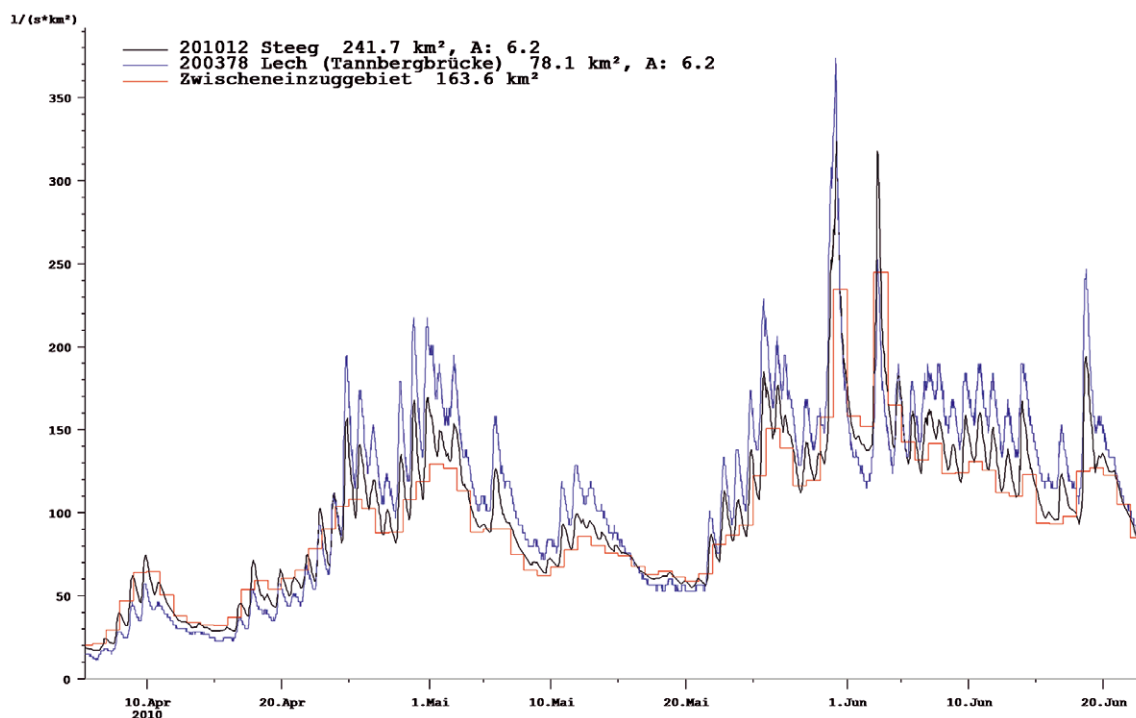


Abb. 2.28 Beispiel für die Plausibilisierung von Durchflüssen anhand der Bilanzierung von Oberlieger (Pegel Lech-Tannbergsbrücke/Lech) und Unterlieger (Steeg/Lech), Tirol

Als weitere Plausibilisierung erfolgt ein Vergleich der Abflüsse (oder Abflussspenden) des zu bearbeitenden Jahres, und zwar der Tages-, Monats-, Jahresmittel, Minima und Maxima, mit den entsprechenden Werten einer Vergleichsreihe (z. B. 5 oder 10 Jahre) und des gesamten Beobachtungszeitraums. So werden z. B. die Monatsmittel des Abflusses des aktuellen Jahres mit den Monatsmitteln der fünf zurückliegenden Jahre unter Berücksichtigung des Niederschlagsverlaufs im aktuellen Jahr verglichen (Abb. 2.29). Im Beispiel zeigen Ober- und Unterlieger einen ähnlichen Jahresverlauf der Abflüsse, und zwar sowohl hinsichtlich der Vergleichsreihe (Balken) als auch im aktuellen Jahr 2008. Die Einzugsgebiete von Ober- und Unterlieger sind von ihren Eigenschaften und der hydrologischen Reaktion vergleichbar und unterliegen den gleichen Witterungsbedingungen, im Jahr 2008 unterdurchschnittlichen Niederschlägen von Jänner bis November und überdurchschnittlichen im Dezember. Deshalb

ist ein ähnlicher Verlauf zu erwarten, einschließlich der etwas höheren Abflussspenden beim Oberliegerpegel Wimitz/Wimitz. Die Daten sind damit plausibel.

Während des Prozesses der Bilanzierung und Plausibilisierung werden auch andere, an der gleichen oder einer in der Nähe befindlichen Messstelle ermittelte Parameter hinzugezogen. So werden z. B. Wasserstände und Durchflüsse mit Niederschlag, Luft- und Wassertemperatur, Grundwasserstand sowie Quellschüttung verglichen und plausibilisiert. Nicht zuletzt dient die Dokumentation und Analyse von Niederschlag-Abfluss-Ereignissen dazu, gemessene Daten zu plausibilisieren.

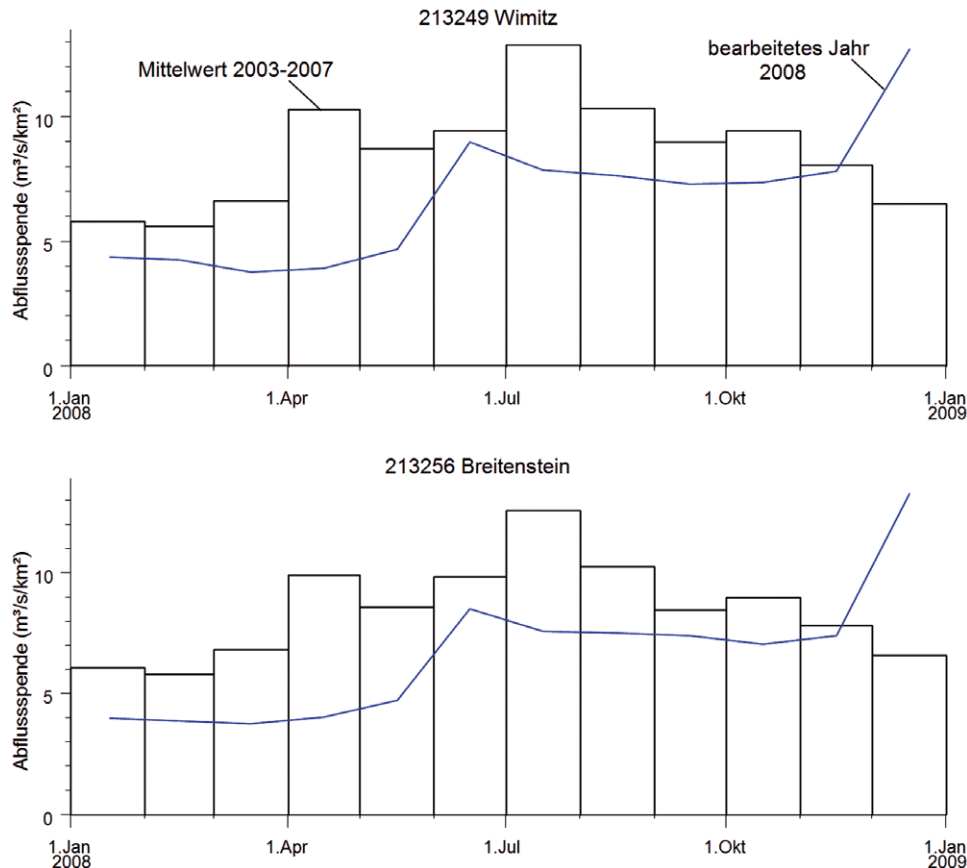


Abb. 2.29 Plausibilisierung von Durchflüssen (Jahresgang, Größenordnung) durch Vergleich der monatlichen Abflussspenden des aktuellen Jahres 2008 mit den mittleren Werten der fünf zurückliegenden Jahre unter Berücksichtigung des Witterungsverlaufs im aktuellen Jahr. Schwarze Balken: Monatsmittel der Vergleichsreihe 2002 – 2007, blaue Linien Monatsmittel des bearbeiteten Jahres. Oben: Wimitz, unten: Breitenstein, Kärnten

(c) *Prüfung der Wasserstands-Durchfluss-Beziehung:* Ungenaue Wasserstands-Durchfluss-Beziehungen sind eine häufige Fehlerquelle. Deshalb erfordern diese besondere Aufmerksamkeit. Besonders im Nieder- und im Hochwasserbereich bestehen oft Unsicherheiten, weil für die Erstellung der Wasserstands-Durchfluss-Beziehungen einerseits oft nicht genügend Durchflussmessungen für diese Bereiche vorliegen und andererseits die Messfehler für sehr kleine und sehr große Durchflüsse viel höher sind. Außerdem sind Messungen im Hochwasserbereich aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeiten, Wellenbildung, Treibgut, Vorlandüberflutung etc. erschwert bzw. sogar unmöglich. Durch Anlandungen und Eintiefungen im Zuge von Hochwasserereignissen oder durch Arbeiten im Gerinne kann es zu Profiländerungen kommen, sodass die bestehende Wasserstands-Durchfluss-Beziehung nicht mehr anwendbar ist.

Der Hydrographische Dienst versucht, dies durch regelmäßige Kontrollmessungen rechtzeitig zu erkennen und notwendige Änderungen vorzunehmen. Trotzdem werden Unzulänglichkeiten in der Wasserstands-Durchfluss-Beziehung manchmal erst im Zuge einer Niederschlags-Abfluss-Modellierung erkannt. Ergeben die Plausibilitätsuntersuchungen der Daten (siehe Ab-

schnitte (a) und (b) weiter oben in diesem Kapitel) Hinweise auf Unsicherheiten oder Fehler in der Wasserstands-Durchfluss-Beziehung, sollte diese einer strengen Prüfung unterzogen und ggf. überarbeitet werden, vor allem im Niederwasser- und Hochwasserbereich. Eine Möglichkeit besteht darin, zusätzliche Durchflussmessungen durchzuführen. Dies ist aber für die großen Durchflüsse nur selten möglich. Eine zweite Möglichkeit besteht in der Durchführung hydraulischer Berechnungen. Egger und Steinwender (2005) stellen dazu ein vereinfachtes Verfahren vor. Detailliertere Aussagen sind mit hydrodynamischen Modellen möglich, sofern diese zuverlässig geeicht werden können (Abb. 2.30). Zusätzliche Informationen bieten Aussagen von Anrainern über das Ausuferungsverhalten bei Hochwässern.

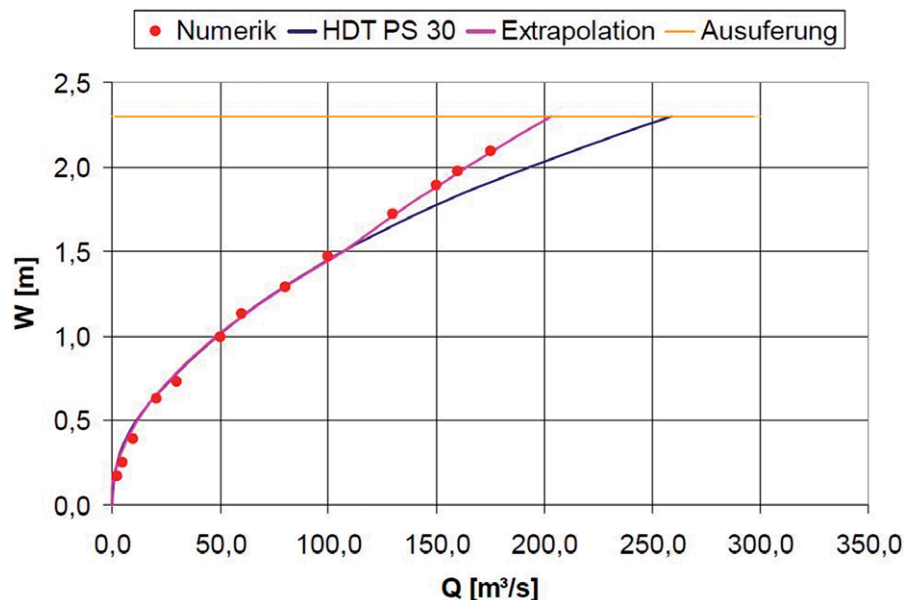


Abb. 2.30 Korrektur der Wasserstands-Durchfluss-Beziehung (schwarze Linie) mithilfe numerischer 3D-Berechnungen (rote Punkte), Beispiel Pegel Hopfgarten/Schwarzach, Tirol (Rutschmann et al. 2007)

(d) *Prüfung der Metainformationen:* Die Stammdaten einer Messstelle enthalten eine Reihe von Informationen, die für die Beurteilung und Interpretation der Daten von Nutzen sind. Das sind einerseits Informationen zur Messstelle und zur Messmethodik, z. B. Lage am Gewässer, Höhenlage, Stationsverlegungen, Änderungen des Pegelnullpunktes, Ausstattung mit Messgeräten, Art der Datengewinnung (Messmethodik, manuell, digital etc.). Andererseits enthalten Stammdaten auch Hinweise über wasserwirtschaftliche Maßnahmen im Einzugsgebiet, wie Speicher, Zu- oder Ableitungen. Diese Metainformationen können beim Stationsbetreiber eingeholt werden bzw. sind teilweise im Hydrographischen Jahrbuch dokumentiert. Die Internetplattform eHYD des Hydrographischen Dienstes in Österreich (<http://ehyd.gv.at>) bietet ebenfalls Stammdaten zu den veröffentlichten Stationen an.

(e) *Anthropogene Beeinflussungen des Abflusses:* Wasserwirtschaftliche Maßnahmen im Einzugsgebiet können die Abflüsse massiv beeinflussen. Dabei handelt es sich nicht um Messfehler, sondern um eine Veränderung des natürlichen Abflussregimes. Beeinflussungen können v. a. aufgrund von Speicherungen (Tages-, Wochen-, Jahrespeicher) sowie Zuleitungen zum oder Ableitungen aus dem Gebiet vorliegen. Beeinflussungen wie in Abb. 2.31 sind unmittelbar aus der Abflussganglinie erkennbar, doch dies ist nicht immer der Fall. Deshalb ist es wichtig, Erkundigungen über abflussrelevante wasserwirtschaftliche Maßnahmen im Einzugsgebiet einzuholen bzw. Metainformationen auszuwerten. Mit Beeinflussungen kann auf mehrere Weise umgegangen werden:

- (i) Die Abflussdaten können rechnerisch bereinigt werden, wenn die Größenordnungen der Beeinflussungen bekannt sind.
- (ii) Die Beeinflussungen können als Teil der Niederschlag-Abfluss-Modellierung abgebildet werden, z. B. der Speicherrückhalt in Stauseen.

- (iii) Besondere Aufmerksamkeit ist den Minima und Maxima zu widmen, da diese manchmal durch die anthropogene Beeinflussung künstlich hervorgerufen bzw. verstärkt werden. Vor allem für den Niederwasserfall sollten dann nicht die hoch aufgelösten Daten und absoluten Minima, sondern Tagesmittel, Wochenmittel oder Monatsmittel verwendet werden.
- (iv) Wenn keine der Möglichkeiten i) bis iii) möglich ist und die Beeinflussungen groß sind, können die Abflussdaten des Pegels nicht für die Kalibrierung bzw. Validierung von Niederschlag-Abfluss-Modellen verwendet werden.

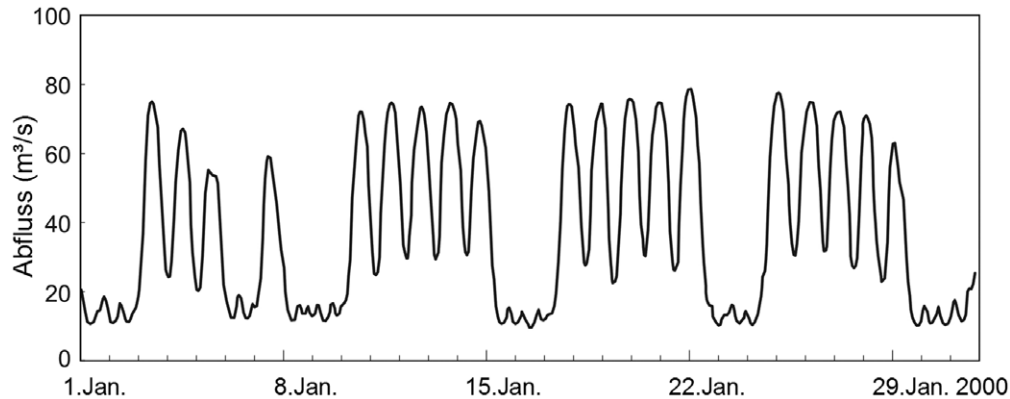


Abb. 2.31 Beispiel für die anthropogene Beeinflussung durch Kraftwerksbetrieb: stärker an Werktagen, geringer am Wochenende oder an Feiertagen. Pegel Kajetansbrücke am Inn, Tirol

BOX 2.12: Qualitätssicherung von Abflussdaten

Es wird empfohlen, alle Abflussdaten visuell zu prüfen. Zudem erhält man dadurch einen Überblick über typische Verläufe und hydrologische Abläufe. Empfehlenswert ist es, sich die Messstellen vor Ort anzusehen.

Für Rohdaten und Daten, die nicht vom Hydrographischen Dienst stammen, wird eine Prüfung empfohlen. Falls notwendig, sollte eine Korrektur erfolgen und diese begründet werden. Für die Prüfung werden ein räumlicher Vergleich mit benachbarten Stationen und ein zeitlicher Vergleich mit langjährigen Mittel- und Extremwerten empfohlen. In die Datenprüfung sollten auch die Wasserstands-Durchfluss-Beziehungen einbezogen und diese, wenn notwendig, in Absprache mit dem Stationsbetreiber überarbeitet werden. Dafür werden hydraulische Berechnungen empfohlen.

Es wird empfohlen, beim Stationsbetreiber Informationen über die Situation an der Messstelle, über die Qualität der Daten, eventuelle Prüfungen und Korrekturen, Art der Messung, Änderungen der Datenerfassung oder Stationsverlegungen einzuholen und bei der Interpretation der Daten zu berücksichtigen.

Zusatzinformationen (Einzugsgebiet, klimatische Bedingungen und Witterungsabläufe, Ereignisdokumentationen etc.) können nützliche Hinweise zur Plausibilisierung der Abflussdaten geben. Hinweise zu anthropogenen Beeinflussungen geben die Stammdaten des Pegels sowie Anmerkungen und Fußnoten im jeweiligen Hydrographischen Jahrbuch von Österreich.

2.3.3. Ereignisdokumentation

Wenn das Hauptinteresse der Modellierung auf Hochwässern liegt, ist es wichtig, den Niederschlag-Abfluss-Prozess bei Hochwässern gut zu verstehen. Eine wichtige Basis dafür sind vorhandene oder zu erstellende Dokumentationen abgelaufener Hochwasserereignisse. Dies gilt insbesondere für Wildbacheinzugsgebiete, in denen oft keine Pegelaufzeichnungen vorhanden sind. Jedoch auch in Gebieten anderen landschaftlichen Charakters (ländliche und städtische Gebiete) sowie in großen Gebieten mit gemischtem Charakter können die Dokumentation und Analyse abgelaufener Ereignisse eine wichtige Hilfestellung für die Modellierung geben (Hübl et al. 2012; Blöschl et al. 2013a), um im Sinne der Hochwasserentstehung kritische Kombinationen von Einflussfaktoren zu erkennen. Die folgenden Elemente zählen zu einer hilfreichen Dokumentation von Hochwasserereignissen:

- Vorbedingungen des Ereignisses (Schnee, Vorregen, Bodenfeuchte).
- Niederschlag (maximale Intensitäten, Summe, räumliche Verteilung, Schneeanteil).
- Ereignistyp (z. B. Moser et al. 2016) und Großwetterlage bzw. Zugbahn (vgl. WETRAX-Projekt, Hofstätter et al. 2015).
- Abflussbildung und Abflusskonzentration (auf Basis von Abflussmessungen, Spuren im Gelände, visuellen Beobachtungen Ortsansässiger und Wasserspiegelanschlaglinien).
- Wellenablauf (Zusammenspiel mehrerer Gebiete, Berechnung oder Abschätzung von Wellenlaufzeiten, Retention im Vorland, Einfluss von Wasserbauten).
- Vergleich mit anderen Ereignissen im gleichen oder in ähnlichen Gebieten und Einordnung der Jährlichkeit des Ereignisses.

BOX 2.13: Ereignisdokumentation

Wenn das Hauptinteresse der Modellierung auf Hochwässern liegt, wird eine Dokumentation abgelaufener Ereignisse bzw. eine Auswertung vorhandener Dokumentationen empfohlen. Eine solche Dokumentation sollte Informationen über Vorbedingungen, Niederschlag, Abflussbildung und Abflusskonzentration, Wellenablauf und einen Vergleich mit anderen Ereignissen enthalten.

2.3.4. Lokale und regionale Abflussstatistik

Für die Berechnung von Hochwasser kennwerten (Scheitelwerte bestimmter Jährlichkeit HQ_n , z. B. HQ_{100}) mit Niederschlag-Abfluss-Modellen ist ein Bezug zur Hochwasserabflussstatistik, Informationserweiterung und Regionalisierung sehr wesentlich (siehe Kapitel 5.3.). In diesem Zusammenhang wird auf das DWA-Merkblatt M 552 (Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, DWA 2012, siehe Tab. 2.3) und den Leitfaden zur Abschätzung von Hochwasser kennwerten (BMLFUW 2011) verwiesen, die insbesondere die Kombination der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Hochwasserstatistik zur Bestimmung von HQ_n im Detail darlegen. Für große Ereignisse (z. B. HQ_{5000}) wird auf den Leitfaden für die Bemessung von Talsperren in Österreich (Gutknecht et al. 2009) verwiesen. Des Weiteren wird auf die regionalen hochwasserstatistischen Auswertungen des HORA (HOchwasserRisikozonierung Austria)-Projektes verwiesen (Merz et al. 2008ab). Eine Aktualisierung des Projektes (HORA 3.0) ist in Ausarbeitung.

Die Abb. 2.32 bis 2.35 zeigen einige Beispiele hochwasserstatistischer Auswertungen für Kärnten. Auf zwei Aspekte der Jährlichkeitszusammenhänge wird im Folgenden genauer eingegangen.

Tab. 2.3 DWA-Merkblatt M 552; Beispiele einander ergänzender Methoden zur Bestimmung von Hochwasserjährllichkeiten (DWA 2012)

Methode	Vorteile	Nachteile
Lokale Hochwasserstatistik	<ul style="list-style-type: none"> Erfasst summarisch Abflussprozesse im Gebiet robust 	<ul style="list-style-type: none"> kurze Reihen verringern Aussagekraft Abflussdaten bei großen Ereignissen oft unsicher bei anthropogenen Beeinflussungen wenig aussagekräftig
Historische Hochwasser	<ul style="list-style-type: none"> Erfassung seltener Ereignisse möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Einschätzung der Jährlichkeit sowie Annahme von Stationarität problematisch
Niederschlag-Abfluss-Modellierung	<ul style="list-style-type: none"> Einzeleinflüsse können gut analysiert werden 	<ul style="list-style-type: none"> Wahl der Eingangsgrößen und Parameter schwierig Jährlichkeit nur näherungsweise definiert
Regionale Hochwasserstatistik	<ul style="list-style-type: none"> größere Datenbasis 	<ul style="list-style-type: none"> regionale Homogenität oft nicht gewährleistet Erfassen lokaler Verhältnisse schwierig

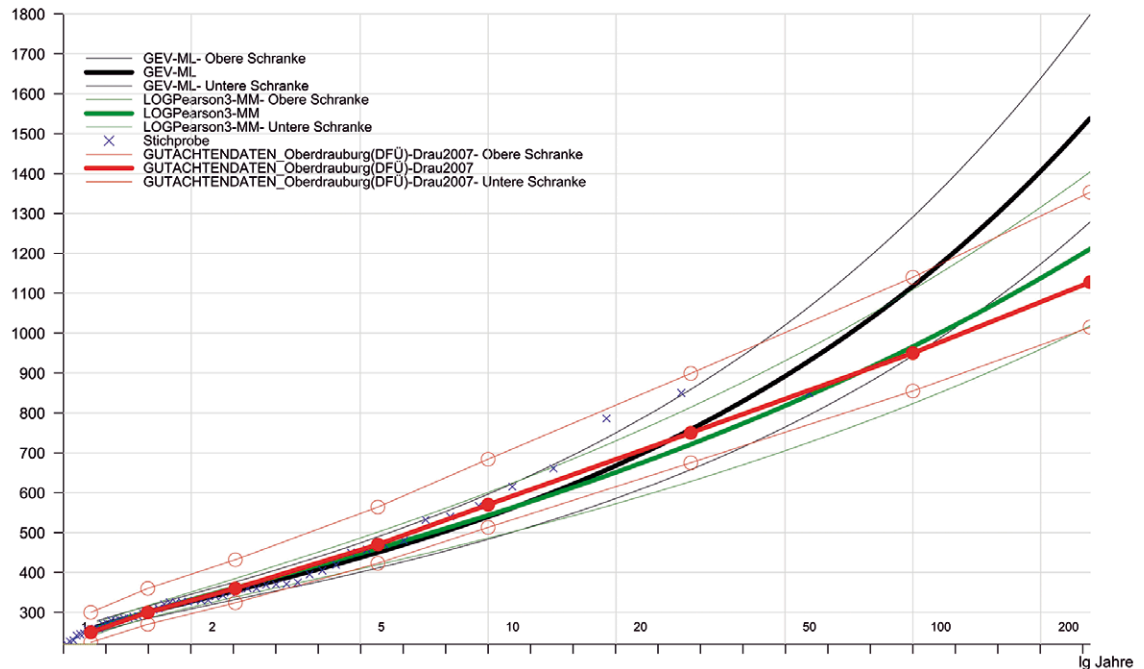


Abb. 2.32 Beispiel Jährlichkeitsdiagramm mit lokaler und regionalisierter Hochwasserstatistik für den Pegel Oberdrauburg/Drau, Kärnten

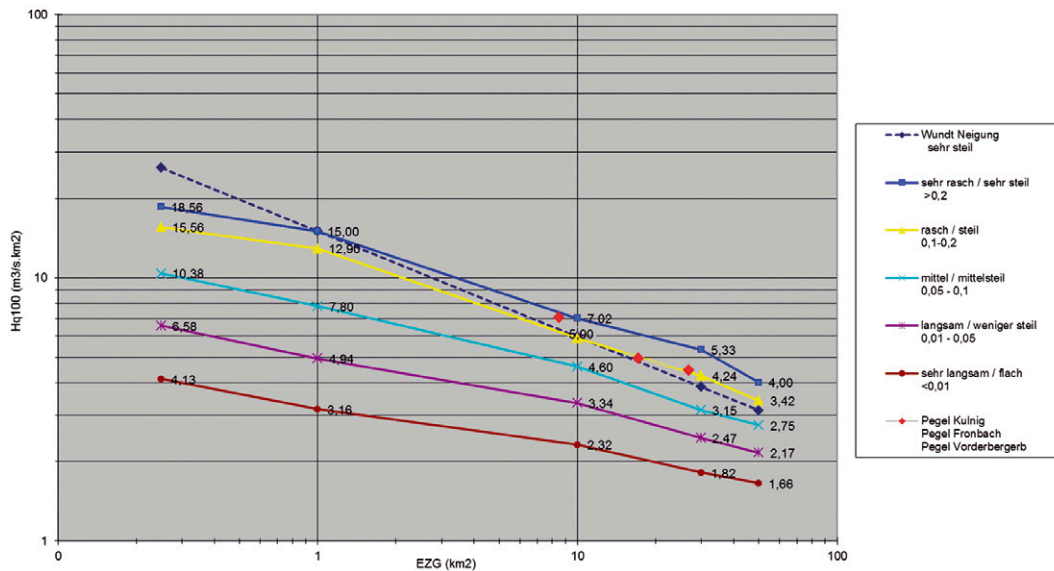


Abb. 2.33 Regionales HQ_{100} -Spendendiagramm für kleine Einzugsgebiete im Bereich südliches Gailtal, Kärnten, basierend auf HQ_n -Statistik und N-A-Analysen von Einzugsgebieten mit Pegeln und Übertragung auf kategorisierte Einzugsgebiete mit unterschiedlichen Einzugsgebietsgrößen und Abflusskonzentrationen/ Gebietsgefälle

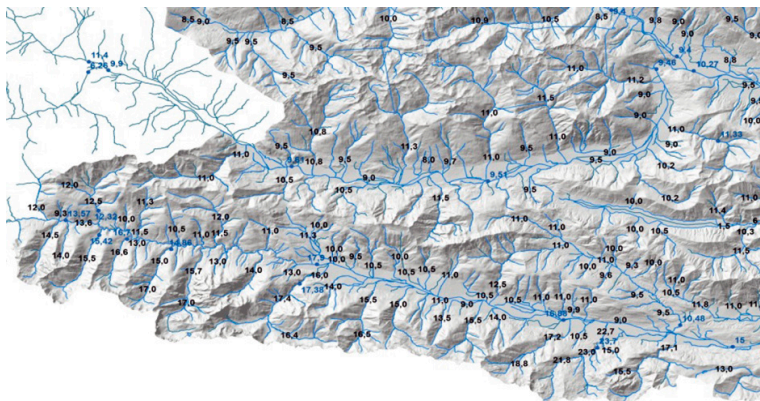


Abb. 2.34 Regionalisierte, statistisch basierte Gebietsfaktoren (GF100) von Pegelstellen (in Anlehnung an die Wundt-Formel: $GF_{100} = HQ_{100}(\text{Statistik})/A_E^{0,6}$, A_E ist die Einzugsgebietsfläche) (blau) und mit einem N-A-Modell übertragene Gebietsfaktoren GF100 für unbeobachtete Gewässer im westlichen Kärnten (schwarz)

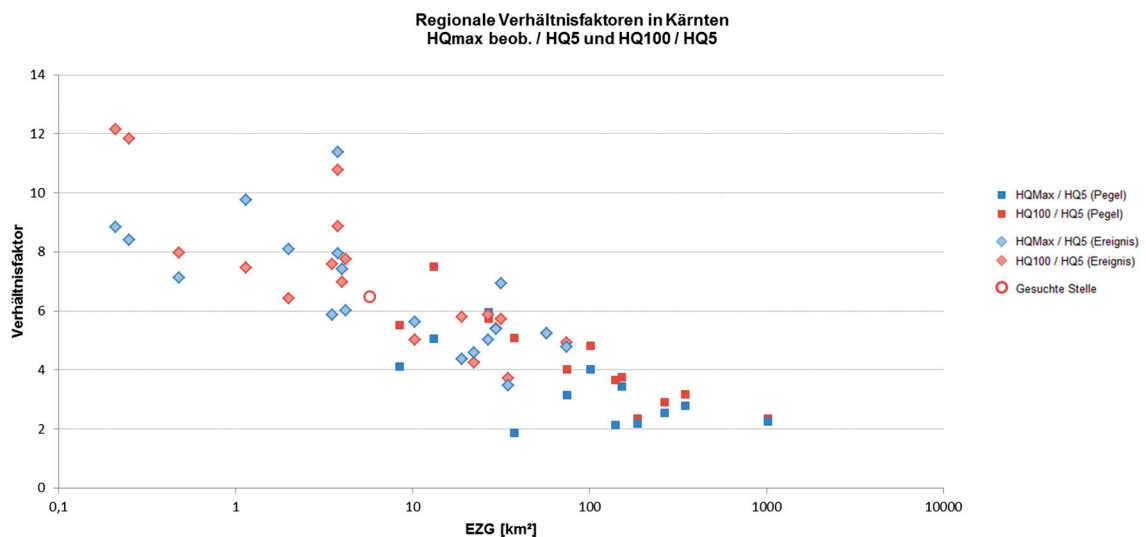


Abb. 2.35 Regionale Verhältnisfaktoren in Kärnten: $HQ_{max\text{ beob.}}/HQ_5$ und HQ_{100}/HQ_5 . Regionale statistische Analysen und Verhältnisse zur Plausibilisierung/Informationserweiterung der lokalen Hochwasserstatistik (Repräsentativität des Hochwasserkollektivs und Orientierung für HQ_{100} auf Basis HQ_5) in Kärnten

(a) Jährlichkeitszusammenhänge zwischen Abflussspitzen und Frachten

Die Niederschlag-Abfluss-Modellierung bietet die Möglichkeit, für Hochwässer nicht nur Scheiteldurchflüsse, sondern auch Wellenformen zu berechnen. Für einen Vergleich mit statistischen Auswertungen können die Ergebnisse einer bivariaten Hochwasserstatistik herangezogen werden. Dafür wird z. B. für die Hochwasserereignisse, die einen bestimmten Durchfluss übersteigen, der Hochwasserscheiteldurchfluss (m^3/s) gegen die Abflussfracht (m^3) aufgetragen. Abb. 2.36 zeigt ein Beispiel für eine derartige Gegenüberstellung. In solche Darstellungen können die Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung eingetragen werden, zur Einordnung der Auswirkung z. B. unterschiedlicher Dauerstufen des Niederschlags, der für die Abflussmodellierung verwendet wird. Abb. 2.36 ist interessant, da die Hochwässer in Oberdrauburg durch zwei unterschiedliche Prozesse erzeugt werden:

- Schneeschmelze, manchmal in Verbindung mit Regen im Mai und Juni. Diese Ereignisse weisen große Abflussfrachten und relativ kleine Scheitelabflüsse auf.
- Regen zufolge atmosphärischen Feuchtezustroms aus dem Mittelmeerraum von August bis Oktober. Diese Ereignisse weisen relativ kleine Abflussfrachten und große Scheitelabflüsse auf.

Es ist sinnvoll, derartige Unterschiede in den Prozessen und in dem Fracht-Scheitelabfluss-Zusammenhang bei der Niederschlag-Abfluss-Modellierung und der statistischen Einordnung der Ergebnisse zu berücksichtigen.

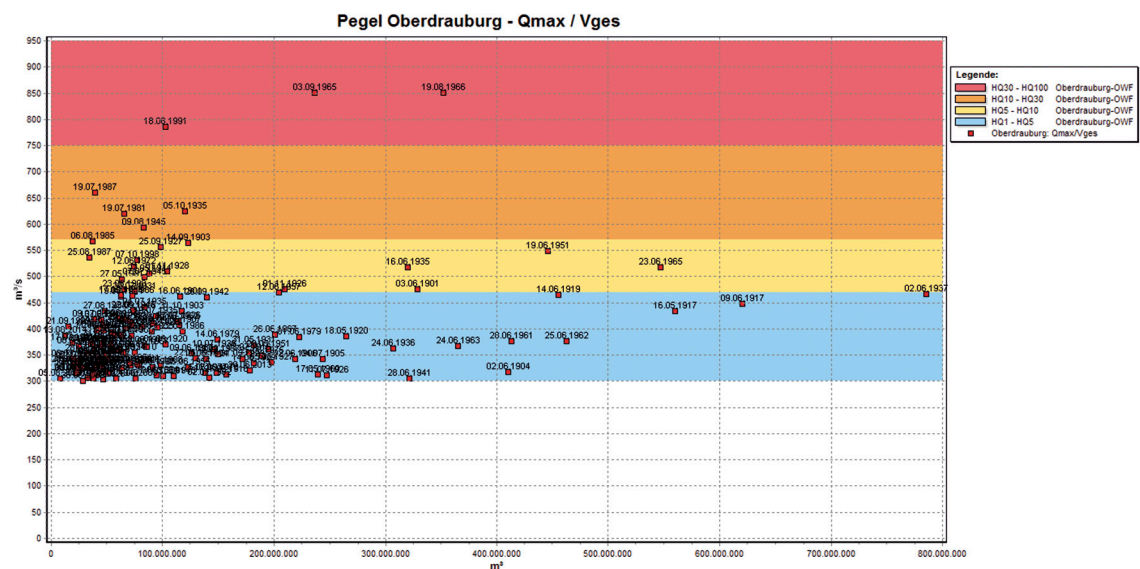


Abb. 2.36 Beispiel Hochwasserscheiteldurchfluss (m^3/s) aufgetragen gegen die Abflussfracht (m^3) des entsprechenden Ereignisses (Hochwasserwellenanalyse). Pegel Oberdrauburg

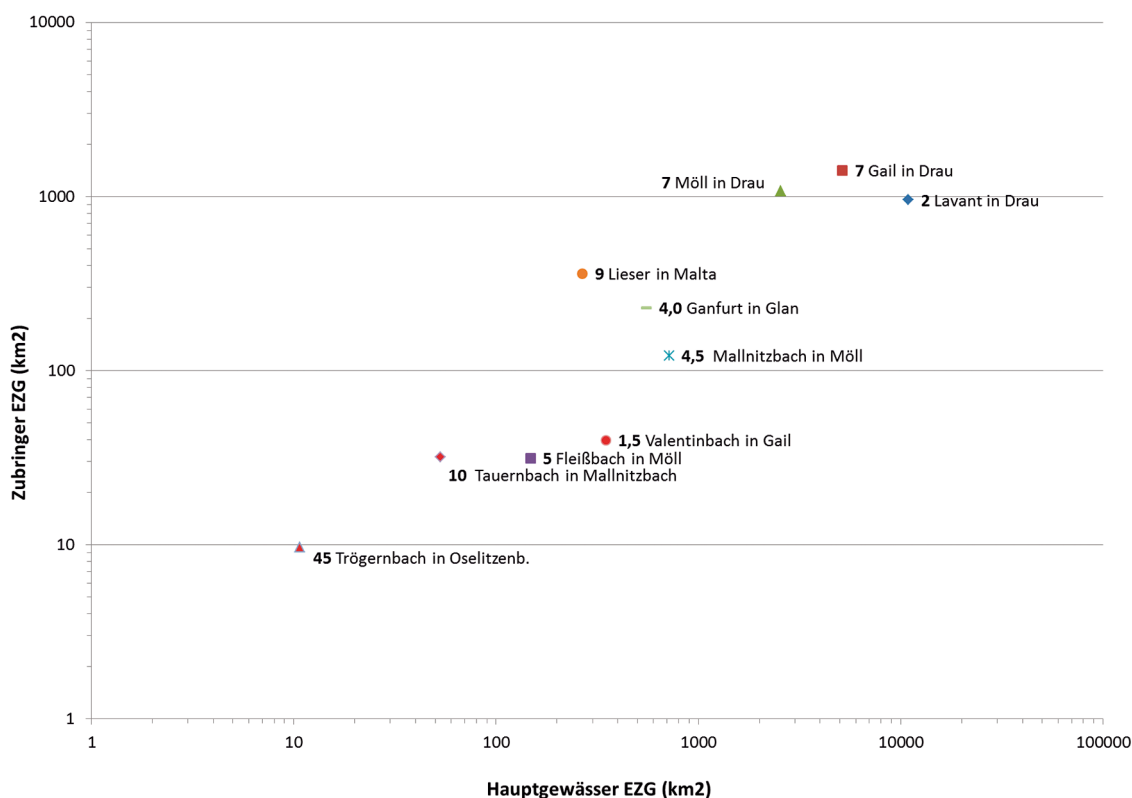
(b) Jährlichkeitszusammenhänge und Hochwasserabflussüberlagerungen im hydrologischen Längenschnitt

Der hydrologische Längenschnitt von Hochwasserscheitelwerten einer bestimmten Jährlichkeit (z. B. HQ_{100}) an Flüssen wird im Regelfall durch statistische Auswertungen von Pegeln und über Regionalisierungsverfahren für unbeobachtete Stellen entlang des Flusses ermittelt. Die Einmündung von Zubringern macht sich dabei durch einen Sprung im Längenschnitt bemerkbar. Häufig stellt sich die Frage, welche Mengen die Zubringer bringen müssen, damit am betrachteten Hauptfluss sowohl oberhalb als auch unterhalb der Mündung die zu bestimmende Jährlichkeit von z. B. 100 Jahren gegeben ist, d. h.

$$HQ_{100} \text{ (nach dem Zubringer)} = HQ_{100} \text{ (vor dem Zubringer)} + HQ_x \text{ (des Zubringers)}$$

Am besten sind diese Jährlichkeitszusammenhänge an Flussstellen bewertbar, wo am Hauptgewässer vor und nach dem Zubringer und am Zubringer selbst im Mündungsbereich Pegel mit repräsentativen Aufzeichnungen bestehen, also insgesamt 3 Pegel im Nahbereich der Einmündung von markanten Zubringern vorhanden sind.

Abb. 2.37 zeigt die Überlagerungs-Jährlichkeiten der Zubringer zu Hauptgewässern in Kärnten. Der Durchfluss im Hauptgewässer entspricht dabei immer einem HQ_{100} . Die Durchflussdifferenz im HQ_{100} -Längenschnitt der Drau an der Einmündung der Möll entspricht dem Durchfluss an der Möll mit einer Jährlichkeit von 7. Die Durchflussdifferenz im HQ_{100} -Längenschnitt der Lieser an der Einmündung der Malta entspricht dem Durchfluss an der Malta mit einer Jährlichkeit von 9. Insgesamt zeigt sich, dass je größer das Einzugsgebiet des Hauptgewässers und je unähnlicher die hydrologischen Verhältnisse von Hauptgewässer und Zubringer sind, umso kleiner die Überlagerungs-Jährlichkeit der Zubringer wird.



Erklärung: 7 Gail in Drau... bedeutet, dass für den statistischen Längenschnitt HQ100 der Drau, der Beitrag der Gail ein HQ7 ist.

Abb. 2.37 Jährlichkeitszusammenhänge Hauptgewässer (HQ_{100}) und Zubringer (HQ_x): Überlagerungs-Jährlichkeiten der Zubringer zu Hauptgewässern (Hauptgewässer hat HQ_{100}). Flächen vor Zusammenfluss. „7 Möll in Drau“ bedeutet, dass die Durchflussdifferenz im HQ_{100} -Längenschnitt der Drau an der Einmündung der Möll dem Durchfluss an der Möll mit einer Jährlichkeit von 7 entspricht

Tab. 2.4 vergleicht für zwei markante Hochwasserereignisse die Scheitelabflüsse der Salzach am Pegel Salzburg und am Pegel Oberndorf, der unterhalb der Einmündung der Saalach in die Salzach liegt. Während die Hochwasserabflüsse in Salzburg bei beiden Ereignissen vergleichbar sind, führt der unterschiedliche Beitrag des Zubringers Saalach (Pegel Siezenheim) zu unterschiedlich großen Hochwasserspitzen bzw. Jährlichkeiten am Unterliegerpegel Oberndorf.

Tab. 2.4 Durchflüsse und Jährlichkeiten der Hochwässer 2002 und 2013 an der Salzach vor und nach Einmündung der Saalach

Pegel	Gewässer	HQ 2002 [m ³ /s]	Jährlichkeit 2002 [Jahre]	HQ 2013 [m ³ /s]	Jährlichkeit 2013 [Jahre]
Salzburg (vor Mündung Saalach)	Salzach	2289	100	2410	100
Siezenheim	Saalach	923	< 50	1098	100
Oberndorf (nach Mündung Saalach)	Salzach	2884	50	3470	300

BOX 2.14: Hochwasserabflussstatistik

Für Niederschlag-Abfluss-Modellierungen, die Hochwasserabflüsse einer bestimmten Jährlichkeit zur Aufgabe haben, sind begleitende hochwasserstatistische Auswertungen von repräsentativen Pegeln in der Region durchzuführen, sofern vorhanden. Dazu zählt eine Regionalisierung der statistischen Ergebnisse entsprechend den angeführten Leitfäden, sofern nicht bereits regionalisierte Ergebnisse vorliegen (Rücksprache mit Hydrographie; HORA etc.). Die dabei gewonnenen regionalen, statistischen Aspekte sind zur Plausibilisierung der Ergebnisse des Niederschlag-Abfluss-Modells oder zur abflussstatistischen Kalibrierung des Modells heranzuziehen (Kapitel 5.3.).

3. Modellwahl (Modellkonzepte)

3.1. Kriterien für die Modellwahl

Seit den Anfängen der hydrologischen Modellierung sind immer komplexere Modelle entstanden, um die hydrologischen Prozesse, ihre Ursachen, Einflussfaktoren und Wechselwirkungen in den verschiedenen Raum- und Zeitskalen besser erfassen zu können und anwendungsorientierte Lösungen bereitzustellen (Gutknecht 2000; Beven 2001).

Bei der Modellwahl sind vor allem vier Faktoren zu berücksichtigen (Abb. 3.1): Aufgabenstellung, Datenerfordernis und -verfügbarkeit, relevante hydrologische Prozesse und Modellkomplexität sowie praktische Erfahrung mit den zur Auswahl stehenden Modellen.

(a) Aufgabenstellung: Niederschlag-Abfluss-Modelle sind nicht für alle Aufgabenstellungen gleich gut geeignet. Für die Bemessung von Hochwässern sind solche Modelle geeignet, die gut auf Extremereignisse extrapolieren können. Für die Beurteilung von Landnutzungs- und Klimawandel muss die Extrapolierbarkeit auf diese unterschiedlichen Situationen gegeben sein. Bei Bewirtschaftungsfragen kann es notwendig sein, dass die Modelle auch das Verhalten von wasserwirtschaftlichen Anlagen abbilden. Modelle für operationelle Abflussvorhersagen sollen wiederum robust sein. Insgesamt stehen dabei die prognostischen Fähigkeiten des Niederschlag-Abfluss-Modells im Vordergrund.

(b) Datenerfordernis und -verfügbarkeit: Das Modell sollte nur solche Daten erfordern, die für das Gebiet zur Verfügung stehen bzw. verfügbar gemacht werden können. Darunter sind sowohl Eingangsdaten (Zeitreihen von Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte etc.) als auch Grundlagendaten zur Parameterableitung (Bodenkarten, Geologie, Landnutzung etc.) zu verstehen. Neben der direkten Verfügbarkeit ist die Bestimmbarkeit der verwendeten Modellparameter aus den Grundlagendaten ein Kriterium. Zentrale Frage dabei ist, ob das Modell mit den zur Verfügung stehenden Datensätzen betrieben werden kann, oder die Modellkomplexität unverhältnismäßig hoch im Vergleich mit den verfügbaren Daten ist (Näheres dazu siehe Kapitel 4.4.5.).

(c) Relevante hydrologische Prozesse und Modellkomplexität: Die Modellwahl ist auch von den zu beschreibenden hydrologischen Prozessen abhängig, wie Abflussvorgänge, Sedimenttransport, Verdunstung, Bodenfeuchtedynamik, Grundwasserneubildung, Grundwasserbewegung, Schneedeckenaufbau und Schmelze. Diese Prozesse werden in den verschiedenen Modellen in unterschiedlicher Komplexität abgebildet, manchmal nur sehr vereinfacht, und manchmal sind sie überhaupt nicht enthalten. Demnach sind die Modelle so zu wählen, dass die relevanten Prozesse durch entsprechende Modellkomponenten erfasst werden. Auch die Wahl der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung hängt mit den zu erfassenden Prozessen zusammen.

(d) Praktische Erfahrung mit den zur Auswahl stehenden Modellen: Die Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen erfordert ein hohes Maß an Fachkenntnis und Verständnis für die dahinterliegende Modellstruktur (Bormann et al. 2011). Deshalb ist es jedenfalls sinnvoll, dass der Bearbeiter bereits praktische Erfahrungen mit dem Modell gesammelt hat. Modelle, mit denen Erfahrungen vorliegen, sind also gegenüber solchen zu bevorzugen, bei denen dies nicht der Fall ist. Anderenfalls ist eine entsprechende Einarbeitungszeit vorzusehen. Je komplexer das Modell, desto länger ist i. A. die Einarbeitungszeit.

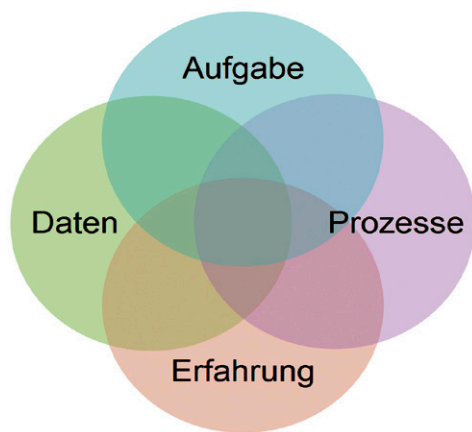


Abb. 3.1 Kriterien für die Wahl von Niederschlag-Abfluss-Modellen

BOX 3.1: Kriterien für die Modellwahl

Es wird empfohlen die Modellwahl entsprechend der folgenden vier Kriterien zu treffen:

- Aufgabenstellung,
- Datenerfordernis und -verfügbarkeit,
- relevante hydrologische Prozesse und Modellkomplexität und
- praktische Erfahrung mit den zur Auswahl stehenden Modellen.

Zu den ersten drei Punkten werden in den nachfolgenden Kapiteln 3.2. und 3.3. detaillierte Empfehlungen gegeben.

Eine entsprechende praktische Erfahrung des Bearbeiters ist unbedingt notwendig. Sofern diese nicht vorab gegeben ist, ist eine entsprechende Einschulung und Einarbeitung vorzusehen.

3.2. Modelltypen und raum-zeitliche Gliederung des Modells

Niederschlag-Abfluss-Modelle können in deterministische und statistische Modelle unterteilt werden. Deterministische Niederschlag-Abfluss-Modelle beschreiben den Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abfluss mit deterministischen Variablen, während statistische Modelle den Zusammenhang mit Zufallsvariablen beschreiben, die über eine Wahrscheinlichkeit definiert sind. Damit lassen sich auch Zufallseigenschaften der Prozesse und Unsicherheiten abbilden.

Statistische Modelle besitzen oft eine einfachere Modellstruktur als deterministische Modelle. Beispiele für statistische Modelle sind Zeitreihenmodelle und neuronale Netze, die jedoch nicht Teil dieses Regelblatts sind. Im Folgenden wird der Schwerpunkt auf deterministische Modelle gelegt, da diese die weiteste Verbreitung haben und für die Praxis relevanter sind.

3.2.1. Kausalität und Modellkomplexität

Deterministische Modelle können grundlegend nach dem Grad der Modellkausalität bzw. Komplexität unterschieden werden, von prozessnahen White-Box-Modellen, einfacheren Grey-Box-Modellen bis hin zu Black-Box-Modellen, die nicht den Anspruch der Prozessnähe besitzen (Dyck und Peschke 1995).

(a) *White-Box-Modelle (physikalisch basiert)*: Bei diesen Modellen basiert die mathematische Formulierung des Prozesses auf den Grundlagen der Physik bzw. auf im Labor gewonnenen Beziehungen (Blöschl 1996b). Beispiele sind das Green-Ampt-Modell für die Infiltration, die Richards-Gleichung für die Wasserbewegung in der ungesättigten Bodenzone, das

Darcy'sche Gesetz für die Grundwasserbewegung und die St.-Venant-Gleichungen und ihre Vereinfachungen (kinematische Welle, Diffusionsanalogie etc.) für den Oberflächenabfluss. Der Vorteil solcher Modelle ist die Extrapolierbarkeit des Modellverhaltens auf unbeobachtete Situationen (z. B. geänderte Gerinnegeometrie, Landnutzung, größere Ereignisse als in den Messdaten vorhanden) (Grayson und Blöschl 2000b). Allerdings sind für die Bestimmung der Modellparameter detaillierte Daten über das Gebiet hinsichtlich Abflussverhalten, Böden, Bewuchs und Landnutzung erforderlich (siehe Kapitel 2.4., Gebietseigenschaften), die oft nicht vorhanden sind.

(b) Grey-Box-Modelle (Konzeptmodelle): Diese stützen sich auf physikalische Gesetze in vereinfachter Weise (Modellkonzepte) und enthalten ein gewisses Maß an Empirie. Bei Konzeptmodellen beschreibt die mathematische Formulierung jene Prozesse, deren Gültigkeit für den Niederschlag-Abfluss-Prozess postuliert wird. Beispiele sind linearer Speicher, Kaskade von linearen Speichern, Parallelschaltung von Speichern oder Speicherkaskaden und nichtlineare Speicher. In einem größeren Modell können mehrere einzelne Konzeptmodelle als Bausteine integriert sein. Beispielsweise können Linearspeicheransätze und Zeit-Flächen-Diagramme kombiniert werden. Linearspeicher finden Anwendung in der Beschreibung des Oberflächen- und des Bodenwassers in den Modellen NASIM, HBV, ZEMOKOST, BROOK, HQsim, P2R (siehe Kapitel 7.). Durch ihre Stellung zwischen physikalischen und Black-Box-Modellen werden sie bevorzugt für Gebiete verwendet, in denen eine Kalibrierung mit Abflussdaten möglich ist. Aufgrund ihres physikalischen Bezugs ist es möglich, manche Parameter a priori zu setzen bzw. aus Nachbargebieten abzuleiten, die ein ähnliches hydrologisches Verhalten aufweisen (siehe auch Kapitel 4.5. – A-priori-Parameter). Dies ermöglicht eine Anwendung auch in Gebieten ohne Abflussmessungen.

(c) Black-Box-Modelle: Diese basieren nicht explizit auf den physikalischen Grundgesetzen, sondern betrachten nur Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen dem Systemeingang und dem Systemausgang (i. A. Niederschlag und Abfluss). Black-Box-Modelle basieren nicht auf den physikalischen Gleichungen und sind somit rein empirisch. Ohne die inneren Vorgänge in der Black Box (dem Einzugsgebiet) zu betrachten, werden ihre Modellparameter anhand ihrer Inputs und Outputs (Niederschlags- und Abflussdaten) mit einem mathematischen Gütekriterium geschätzt, oder es wird ein Modell samt Parametern gutachterlich ausgewählt. Was innerhalb der Black Box vorgeht, wird nicht beachtet. Typische Vertreter sind das Einheitsganglinien-Verfahren (Unit Hydrograph) und Modelle, die Ganglinienformen vorgeben. Der Vorteil von Black-Box-Modellen ist ihre Einfachheit, wodurch die Anwendung mit geringem Aufwand erfolgen kann und der Datenbedarf relativ gering ist (allerdings sind Abflussdaten für die Kalibrierung erforderlich). Demgegenüber besitzen Black-Box-Modelle generell den Nachteil der schlechten Extrapolationseigenschaften auf Situationen, die nicht im Kalibrierungsdatensatz enthalten sind. Voraussetzung für ihre sinnvolle Anwendung ist deshalb, dass das Abflussverhalten der prognostizierten Situationen dem in den Daten grundsätzlich ähnlich ist.

BOX 3.2: Kausalität und Modellkomplexität

Aufgabe: Für Aufgabenstellungen, bei denen die Extrapolierbarkeit auf Situationen, die nicht in den Daten enthalten sind (größere Ereignisse, Landnutzungsänderungen), wichtig ist, sind White- und Grey-Box-Modelle gegenüber Black-Box-Modellen zu bevorzugen. Demgegenüber ist ihr größerer Bearbeitungsaufwand abzuwägen.

Daten: White- und Grey-Box-Modelle erfordern i. A. mehr Daten. Black-Box-Modelle erfordern Abflussdaten für die Kalibrierung.

Prozesse: Falls interne Prozesse (z. B. Bodenfeuchte) dargestellt werden sollen, sind White- oder Grey-Box-Modelle erforderlich.

Erfahrung: White- und Grey-Box-Modelle bedürfen i. A. einer größeren Erfahrung des Nutzers und sind numerisch aufwendiger.

3.2.2. Räumliche Gliederung

Hinsichtlich der räumlichen Gliederung von Niederschlag-Abfluss-Modellen können (a) Blockmodelle (die Gebiete werden als eine Einheit aufgefasst), (b) halbverteilte Modelle (ähnliche Teilgebiete werden zusammengefasst und unähnliche unterschieden) und (c) verteilte (flächendetaillierte) Modelle unterschieden werden (Parajka et al. 2013). In Abb. 3.2 und 3.3 sind hierzu verschiedene Abstraktionsvarianten hinsichtlich der Abbildung von Abflussbildung und Abflusskonzentrationsprozessen dargestellt.

Erfolgt eine räumliche Untergliederung von Einzugsgebieten in den Modellen, kann auf Teil-einzugsgebiete, Unterschiede in der Hydrogeologie, Niederschlag und Landnutzung, Lage von wasserwirtschaftlichen Anlagen und Lage von Pegeln abgestimmt werden.

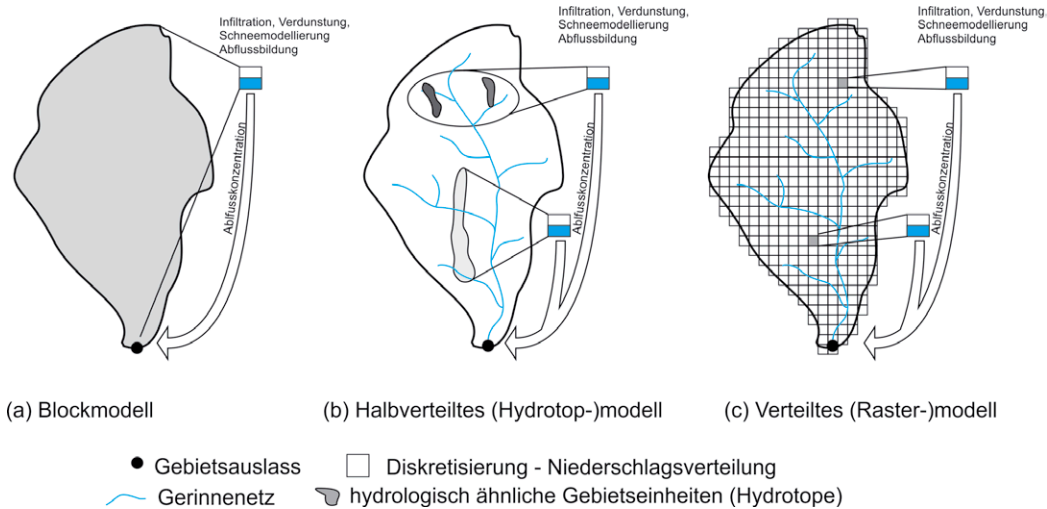


Abb. 3.2 Einteilung der Modellarten hinsichtlich der räumlichen Gliederung für die Abflussbildung

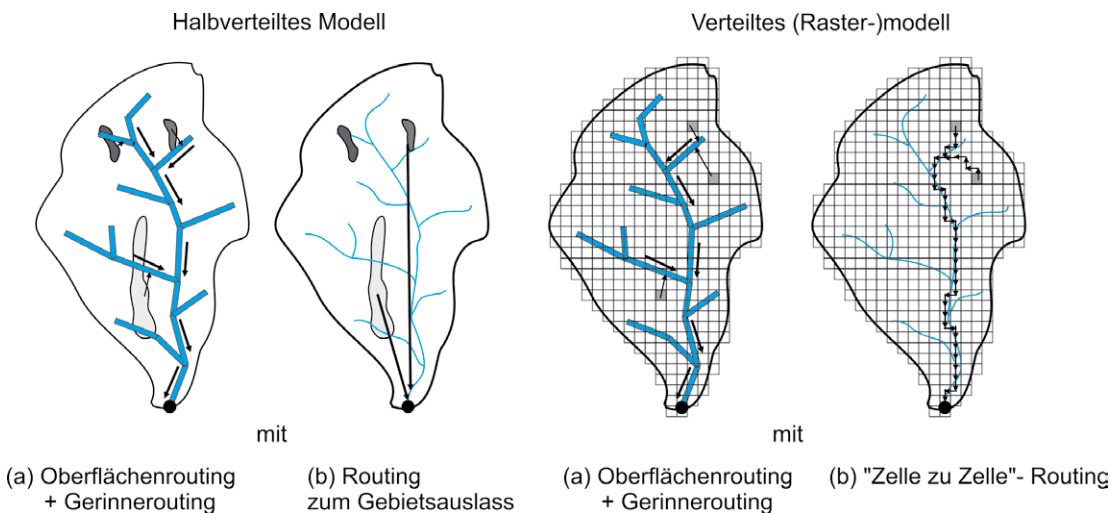


Abb. 3.3 Einteilung der Modellarten hinsichtlich der räumlichen Gliederung für die Abflusskonzentration

(a) *Blockmodelle*: Bei diesem Modelltyp ist keine Untergliederung des Einzugsgebiets vorgesehen. Das Gebiet wird als eine Einheit betrachtet. Zustandsgrößen wie die Bodenfeuchte werden nur als Gebietsmittelwerte abgebildet. Ebenso sind die Modellparameter repräsentative Werte für das ganze Gebiet. Deshalb ist die physikalische Interpretierbarkeit oft nicht gegeben. Für ein Flussgebiet werden oft Teileinzugsgebiete jeweils durch einen Block abgebildet und eine Transferfunktion beschreibt den Wellenablauf in den Flussstrecken. In Hinblick auf die Kausalität sind Blockmodelle meist Black-Box-Modelle oder Grey-Box-Modelle. White-Box-Modelle sind als Blockmodelle nicht sinnvoll, da deren physikalische Interpretierbarkeit verloren geht. Der Vorteil von Blockmodellen ist ihre Einfachheit und ihr geringer Datenbedarf.

Allerdings werden möglicherweise wichtige Details und räumliche Unterschiede im Gebiet nicht explizit erfasst.

(b) Halbverteilte Modelle: Halbverteilte Modelle fassen „hydrologisch ähnliche“ Teilgebiete zusammen. Bei Isochronenmodellen wird das Einzugsgebiet in Streifen mit gleicher Laufzeit (Isochronenstreifen) bis zum nächsten Gerinne bzw. Gebietsauslass unterteilt. Als typische Vertreter sind das Flutplanverfahren, das Zeit-Flächen-Diagramm (Gutknecht 1972) oder auch einzelne Programmzweige von NASIM zu nennen.

Bei höhengegliederten Modellen erfolgt die Einteilung, entsprechend der Topografie, in Höhenstreifen. Dadurch ist es möglich, räumliche Unterschiede der Schneeakkumulation, Schmelze und der Unterscheidung zwischen Schneefall und Regen zu modellieren. Die Erfahrung mit derartigen Modellen zeigte, dass die Höhenstreifen eine Höhererstreckung von 250 m nicht überschreiten sollten (Charbonneau et al. 1981; Nester et al. 2012). Bei typischen Höhengradienten der Lufttemperatur entspricht diese Höhererstreckung einem Temperaturunterschied von ca. 1.5 °C zwischen zwei Streifen. Typische Vertreter von höhengegliederten Modellen sind HBV und HQsim (siehe Kapitel 7.).

Bei Hydrotopmodellen (Flügel 1995) werden Teilgebiete (sog. Hydrotope) mit ähnlicher Abflussreaktion zusammengefasst und unähnliche unterschieden. Bei der Ableitung der Hydrotope können Eigenschaften wie Bodenart, Geländeneigung und Bewuchs Berücksichtigung finden. Die Anzahl der Hydrotope kann in der Regel relativ klein gehalten werden (in der Größenordnung von zehn bis hundert), da eine größere Anzahl die Rechenzeit erhöht, aber kaum Unterschiede im berechneten Abfluss im Vergleich zu einer geringeren Anzahl ergibt (Parajka et al. 2013). Zudem erschwert eine große Anzahl von Hydrotopen die Identifizierung von Modellparametern (siehe Kapitel 4.4.5.). Typische Vertreter von Hydrotopmodellen sind BROOK (Federer and Lash 1978; Forster 1992), BROOK 90, HQsim (Kleindienst 1996; Achleitner et al. 2012), ZEMOKOST (Kohl 2011; Stepanek et al. 2004) oder auch einzelne Programmzweige von NASIM (siehe Kapitel 7.).

Der Vorteil von halbverteilten Modellen gegenüber verteilten (flächendetaillierten) Modellen besteht in kürzeren Rechenzeiten. Allerdings muss die Voraussetzung der Ähnlichkeit innerhalb der Teilflächen erfüllt sein. Insbesondere beim Niederschlag, der räumlich variiert, ist diese Voraussetzung nicht immer erfüllt.

(c) Verteilte (flächendetaillierte) Modelle: Verteilte oder auch oft als flächendetailliert bezeichnete Modelle untergliedern das Einzugsgebiet in Teilflächen nach geometrischen Gesichtspunkten (Blöschl und Grayson 2000b). Die Festlegung der Teilflächen erfolgt meist als Quadratraster, seltener nach Dreiecks- oder Trajektoriennetz (nach Schichten- und Falllinien). Die Berechnung der Abflussbildung erfolgt in der Regel für jede Teilfläche getrennt. Die Berechnung der Abflusskonzentration kann entweder das Wasser von Zelle zu Zelle entsprechend den Fließwegen transferieren (Routing) oder vereinfacht mehrere Flächenelemente gemeinsam durch Verteilungsfunktionen beschreiben.

Die Anzahl der Elemente flächendetaillierter Modelle sollte mindestens das Zehnfache der Anzahl der Niederschlagsstationen im Gebiet betragen, um die räumliche Variabilität des Niederschlags in die Berechnungen einfließen zu lassen. Oft wird eine größere Elementzahl gewählt, um auch Unterschiede in den Bodeneigenschaften, der Geologie, Landnutzung oder – bei städtischen Einzugsgebieten – die Geometrie des Kanalnetzes zu berücksichtigen. Grundsätzlich ist es sinnvoll, relevante Informationen einzubeziehen, die sich auf den berechneten Abfluss positiv auswirken. Das ist z. B. dann der Fall, wenn hydrogeologische Informationen aus Begehungen vorliegen (Pirkl 2012) oder wenn wasserwirtschaftliche Infrastruktur berücksichtigt wird. Falls keine lokalen Informationen zur Verfügung stehen und sich die Berechnung auf breitenverfügbare Daten stützt, erhöht eine große Anzahl von Elementen die Rechenzeit und erschwert die Identifikation von Modellparametern, ohne die Ergebnisse wesentlich zu verbessern (Grayson and Blöschl 2000b). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Eigenschaften des Untergrunds räumlich sehr stark variieren und i. d. R. weit-

gehend unbekannt sind. Punktmessungen der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens können beispielsweise innerhalb von 100 m über Zehnerpotenzen variieren (Western et al. 2003). Die naturräumliche Variabilität führt zu einem Skalenproblem, das die zuverlässige Übertragung der Messwerte auf die Modellskala erschwert (Beven 1989; Blöschl 1996a). Kapitel 4. gibt Hinweise zum Umgang mit diesem Skalenproblem.

Typische Vertreter, die den Ansatz flächendetaillierter Modellierung verfolgen, sind u. a. SHE (Abbott et al. 1986), SWMM (Rossmann 2007), KAMPUS (Blöschl et al. 2008a; Reszler et al. 2008a, b), SES (Asztalos et al. 2007; Kirnbauer et al. 2009; Schöber et al. 2010) und THALES (Grayson et al. 1995) (siehe Kapitel 7.).

Der Vorteil flächendetaillierter Modelle gegenüber halbverteilten Modellen besteht darin, dass die Ergebnisse räumlich detailliert ausgegeben werden können. Wenn die Aufgabenstellung flächige Ergebnisse verlangt (z. B. bei der Beurteilung von Sturzfluten), sind deshalb flächendetaillierte Modelle erforderlich. Zudem haben sie das Potenzial, räumliche Unterschiede im Gebiet, einschließlich des Niederschlags, modellmäßig abzubilden. Das kann sich auch auf den Abfluss am Gebietsauslass positiv auswirken. Der Nachteil ist neben dem größeren Rechenaufwand die Notwendigkeit, die Modellparameter für viele Rechenelemente bestimmen zu müssen (siehe Kapitel 4.). Zudem erfordern flächendetaillierte Modelle wegen der meist größeren Modellkomplexität auch mehr Erfahrung bei ihrer Anwendung.

BOX 3.3: Räumliche Gliederung

Aufgabe: Wenn gebietsinterne Ergebnisse (z. B. Zuflüsse zum Hauptgerinne eines Gebiets) benötigt werden, ist ein verteiltes Modell zu empfehlen. Für die Analyse der Auswirkungen der Änderung von Gebietseigenschaften (z. B. Landnutzungsänderung) sind verteilte und halbverteilte Modelle geeignet.

Daten: Verteilte Modelle benötigen mehr Daten als Blockmodelle. Die Anzahl der Elemente (Teilflächen) sollte mindestens das Zehnfache der Anzahl der Niederschlagsstationen betragen. Eine höhere Anzahl der Rechenelemente bedeutet eine höhere Anzahl der Modellparameterwerte, womit deren Wahl erschwert wird (siehe Kapitel 4.2.). Wird die mindest erforderliche Diskretisierung weiter verfeinert, steigt die Rechenzeit, die Ergebnisse werden aber nicht notwendigerweise verbessert.

Prozesse: Die räumliche Diskretisierung soll bei verteilten und halbverteilten Modellen so getroffen werden, dass unterschiedliche Prozesse getrennt erfasst werden (z. B. Höhenklassen von 250 m oder weniger für Schneeprozesse, Flächen mit unterschiedlichen Abflussbildungsseigenschaften).

Erfahrung: Verteilte (flächendetaillierte) Modelle erfordern ein viel höheres Fachwissen als Blockmodelle.

3.2.3. Zeitliche Gliederung

Bei der Einteilung von Niederschlags-Abfluss-Modellen hinsichtlich des Betrachtungszeitraumes unterscheidet man zwischen ereignisbasierten und kontinuierlichen Modellen (Abb. 3.4).

(a) *Ereignismodelle:* Ereignismodelle beschreiben den Niederschlag-Abfluss-Prozess während eines hydrologischen Ereignisses, d. h. für einen Zeitraum von meist einigen Stunden, in dem starke Niederschläge aufgetreten sind, die zu einem starken Anstieg des Abflusses geführt haben. Die Modellierung kann für tatsächlich aufgetretene Ereignisse erfolgen (Nachrechnung) oder für hypothetische Bemessungsereignisse. Da der Betrachtungszeitraum relativ kurz ist, kann bei dieser Art von Modellen die Verdunstung vernachlässigt werden, wodurch die Modellstruktur und die Parameterbestimmung vereinfacht werden. Allerdings sind Anfangsbedingungen über den Systemzustand (Vorbefeuchtung des Bodens, Füllung des

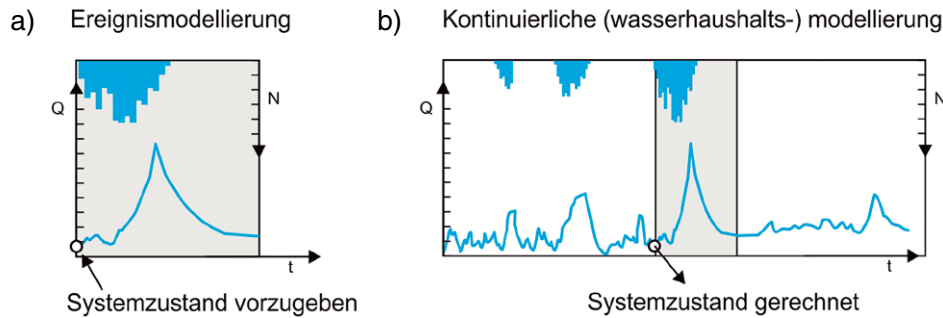


Abb. 3.4 Schematische Darstellung der Betrachtungszeiträume bei (a) ereignisbasierter und (b) kontinuierlicher Modellierung

Grundwasserleiters) vorgeben. Entsprechende Modellvorgaben sind spezifisch für das betrachtete Ereignis und limitieren daher die Übertragbarkeit eines Modells zwischen Ereignissen verschiedener Ausprägung und Randbedingungen. Je unterschiedlicher die Anfangszustände bei verschiedenen Ereignissen sind, desto schlechter übertragbar sind die Modelleinstellungen. Typische Vertreter von Ereignismodellen sind IHK, ZEMOKOST und Blue M (siehe Kapitel 7.).

Der Vorteil von Ereignismodellen gegenüber kontinuierlichen Modellen ist ihre einfachere Struktur (Verdunstung wird nicht beschrieben), wodurch der Datenbedarf geringer ist und die Handhabung einfacher. Zudem kann sich der Blick des Bearbeiters auf einzelne Ereignisse richten, was bei Bemessungsfragen des Hochwassers von Vorteil ist. Dem steht der Nachteil gegenüber, dass die Wahl von Anfangsbedingungen schwierig ist und meist subjektiv oder nach vorgegebenen Regeln durchgeführt wird. Dies erschwert auch die Einschätzung der Wahrscheinlichkeit der Scheitelabflüsse (siehe Kapitel 5.3.).

(b) Kontinuierliche Modelle: Kontinuierliche Modelle beschreiben den Niederschlag-Abfluss-Prozess über einen Zeitraum von Jahren und bilanzieren die Wasserbilanz über den gesamten Modellierungszeitraum. Sie sind deshalb meist komplexer als Ereignismodelle und beschreiben die Verdunstung, die Speicherung im Grundwasser sowie meist die Schneeakkumulation und Schmelze. Zwar sind auch Anfangsbedingungen für den Start erforderlich, doch ist deren Einfluss nur von begrenzter Dauer (wenige Monate bzw. bis das Gebiet gesättigt ist), wodurch es möglich ist, eine „Aufwärmphase“ zu definieren, in der die Modellergebnisse nicht verwendet werden.

Typische Vertreter von kontinuierlichen Modellen sind HBV, HEC-HMS, HQsim, SES, WaSiM, Mike-SHE und Larsim (siehe Kapitel 7.).

Der Vorteil von kontinuierlichen Modellen gegenüber Ereignismodellen besteht darin, dass sie den Niederschlag-Abfluss-Prozess vollständiger beschreiben. Für Fragestellungen, die die Wasserbilanz betreffen, sind deshalb kontinuierliche Modelle erforderlich. Es ist nicht notwendig, Anfangsbedingungen der Bodenfeuchte zu definieren. Zudem erleichtern sie eine Einschätzung der Jährlichkeiten von Hochwässern. In den letzten Jahren werden deshalb zunehmend kontinuierliche Modelle eingesetzt. Der Nachteil besteht vor allem in ihrer größeren Komplexität und dem damit verbundenen größeren Aufwand bei Parameterkalibrierung und der längeren erforderlichen Einarbeitungszeit.

Die geeignete Zeitschrittweite beider Arten von Modellen hängt von der zu lösenden Aufgabe und den betrachteten Prozessen ab. Die zeitliche Diskretisierung muss es ermöglichen, die Dynamik und Art des abzubildenden Prozesses dazustellen und ist auf die Variabilität der zu beschreibenden Prozesse und die Speichereigenschaften des Systems abzustimmen. Dementsprechend unterscheidet sich die geeignete Zeitschrittweite nach der Gebietsgröße und der Erfordernis, einzelne Ereignisse im Detail wiederzugeben. In städtischen Einzugsgebieten mit Reaktionszeiten im Minutenbereich werden typischerweise Zeitschritte von Minuten verwendet, um einzelne Hochwässer gut aufzulösen. Das gleiche gilt für kleine Wildbacheinzugsgebiete. In ländlichen Einzugsgebieten beträgt die geeignete Zeitschrittweite, je nach Größe,

typischerweise Minuten bis zu einer Stunde. Für manche Aufgabenstellungen der Wasserhaushaltsmodellierung kann es aber auch ausreichen, eine zeitliche Auflösung von einem Tag zu wählen.

Bei der Wahl der Zeitschrittweite sind auch numerische Erfordernisse zu bedenken. Die meisten Modelle verwenden ein explizites Lösungsverfahren der zugrunde liegenden Differenzialgleichungen. Bei einem derartigen Verfahren muss das Courant-Kriterium erfüllt sein, um eine stabile Lösung zu erhalten. Das Courant-Kriterium erfordert, dass die Courant-Zahl $c < 1$ ist, d. h. der Zeitschritt muss ausreichend klein gewählt werden, sodass innerhalb eines Zeitschrittes ein Flüssigkeitsteilchen nicht länger als eine Elementgröße transportiert wird. Die Courant-Zahl ist definiert als Verhältnis der simulierten Fließgeschwindigkeit (u) im Modell und dem Quotienten aus räumlicher (Δx) und zeitlicher (Δt) Rasterweite (also ein Verhältnis zweier Geschwindigkeiten).

$$c = \frac{u}{\Delta x / \Delta t}$$

BOX 3.4: Zeitliche Gliederung

Aufgabe: Ereignismodelle werden primär für die Hochwasserbemessung eingesetzt, kontinuierliche Modelle für die Simulation des Wasserhaushaltes über längere Zeit (z. B. Wasserhaushaltsuntersuchungen, Echtzeitprognose).

Daten: Für die kontinuierliche Modellierung sind lange hydrologische Datenreihen erforderlich. Die zeitliche Diskretisierung wird oft an die zeitliche Auflösung der Eingangsdaten angepasst.

Prozesse: Kontinuierliche Modelle beschreiben die Prozesse vollständiger als Ereignismodelle und die Wahl der Anfangsbedingungen ist weniger wichtig. Kontinuierliche Modelle benötigen bei unbekanntem Anfangsbedingungen eine gewisse Vorlaufzeit, die mindestens so lange gewählt werden soll, dass der Boden einmal gesättigt ist und der Schnee vollständig ausgeapert ist. Bei allen Modellen soll die zeitliche Diskretisierung so gewählt werden, dass die relevante Variabilität des Abflusses aufgelöst wird (Tab. 3.1). Bei expliziten, numerischen Lösungsverfahren ist das Courant-Kriterium einzuhalten.

Erfahrung: Kontinuierliche Modelle sind komplexer als Ereignismodelle und erfordern daher mehr Erfahrung.

3.2.4. Nachführungsalgorithmen

Für die operationelle Abflussvorhersage gibt es Methoden, die aktuell gemessenen Abflüsse direkt in die Prognosen für die nächsten Zeitschritte einzubeziehen. Dadurch kann die Prognosegenauigkeit erhöht werden (Blöschl 2008). Das Einbeziehen aktuell gemessener Abflüsse erfolgt über Nachführungsalgorithmen (Komma et al. 2007, 2008). Ein derartiger Algorithmus sind der Kalman-Filter und verschiedene Varianten wie z. B. Extended-Kalman-Filter (EKF) und Ensemble-Kalman-Filter (EnKF). Dabei wird angenommen, dass die Messung des Abflusses und die Berechnung des Abflusses jeweils gewisse Unsicherheiten aufweisen. Aus dem Vergleich kann etwa auf Fehler in den Eingangsdaten zurückgeschlossen werden. Der Vorteil ist besonders bei kontinuierlichen Niederschlag-Abfluss-Modellen groß, wenn sich systematische Fehler des Niederschlags oder der Verdunstung aufsummieren, was zu großen Fehlern in der Abflussprognose führen kann. Derartige Fehler können durch Nachführungsalgorithmen wesentlich reduziert werden.

Eine alternative Methode der Nachführung ist Model Output Statistics (MOS). Dabei kommt es zu keiner Adaptierung modellinterner Variablen, sondern zu einer Anpassung des Simulationsergebnisses. Grundlage bildet ein statistischer Zusammenhang zwischen Simulationen

und Messungen. Zur Ableitung dieses Zusammenhangs sind entsprechende Datenreihen aus der Vergangenheit notwendig. Durch MOS lassen sich zwar systematische Fehler sehr effizient reduzieren, doch ist eine Extrapolation außerhalb des Datenbereichs, der für die Kalibrierung der MOS verwendet wurde, unsicher.

Ein Beispiel für eine Nachführung zeigt Abb. 3.5. Während des gesamten Zeitraums von 1. Oktober bis Ende Dezember sind die beobachteten Abflüsse etwas größer als die simulierte Ganglinie. Die leichte Abflussunterschätzung durch die Simulation kann auf systematische Fehler im Niederschlag, aber auch auf eine Überschätzung der Verdunstung zurückzuführen sein. Die Auswirkung der Abflussunterschätzung in der Simulation ohne Nachführung ist eine Unterschätzung der Bodenfeuchte zu Beginn des Hochwassers Ende März 2006. Dies bewirkt wiederum eine Unterschätzung des Hochwasserereignisses. Die nachgeführte Abflussganglinie bis kurz vor dem Ereignis im März 2006 weist hingegen kaum Unterschiede zur beobachteten Ganglinie auf. Damit wird auch die Bodenfeuchte gegenüber der nicht nachgeführten Simulation erhöht und dadurch die Anfangsbedingung für die Prognose des folgenden Hochwasserereignisses verbessert. Dieses Beispiel veranschaulicht den positiven Einfluss der Inputnachführung über den Zeitraum zwischen Ereignissen auf die Anfangsbedingungen für die Prognose des folgenden Hochwassers. Nachführungsalgorithmen der oben beschriebenen Art sind beispielsweise in den Modellen KAMPUS und HQsim enthalten (siehe Kapitel 7.).

Für die operationelle Abflussvorhersage sind Nachführungsalgorithmen zu empfehlen, da sie die Prognosegüte verbessern können. Es ist jedoch zu beachten, dass die Modellnachführung nicht als Ersatz für eine sorgfältige Entwicklung und Kalibrierung des Niederschlag-Abfluss-Modells dienen kann. Ein gutes Niederschlag-Abfluss-Modell ist Voraussetzung für einen sinnvollen Einsatz von Nachführungsalgorithmen.

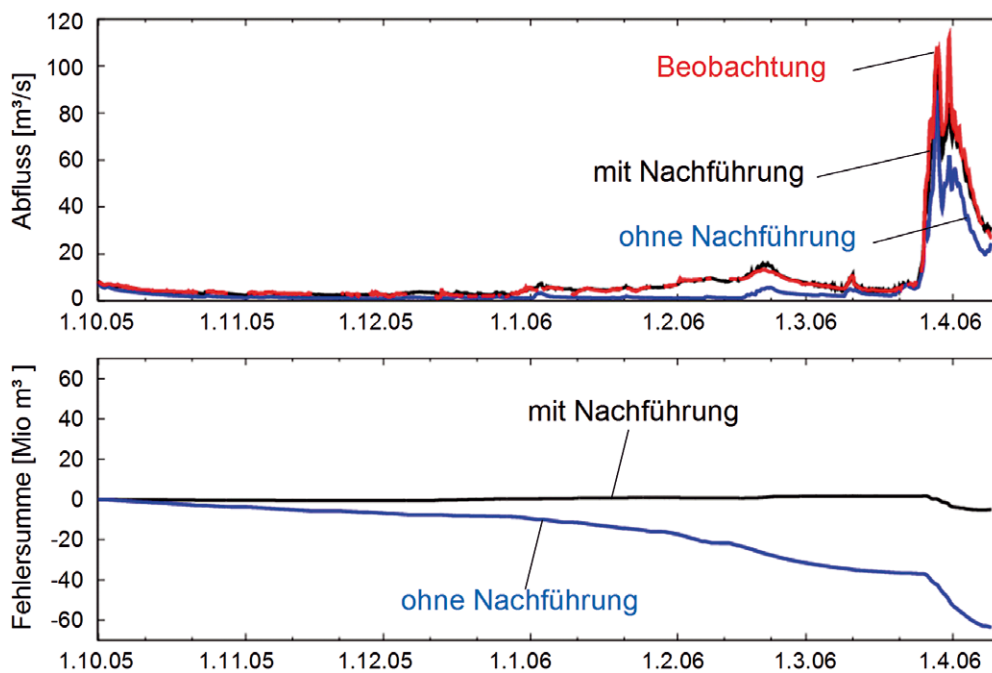


Abb. 3.5 Vergleich der Abflussberechnungen (nachgeführt und nicht nachgeführt) mit der beobachteten Ganglinie und die resultierenden Fehlersummen für den Pegel Zwetl/Kamp im Zeitraum von Oktober 2005 bis April 2006 (aus Komma et al. 2006b)

BOX 3.5: Nachführungsalgorithmen

Aufgabenstellung: Für operationelle Abflussvorhersagen werden Nachführungsalgorithmen empfohlen.

3.2.5. Typische Diskretisierung nach Aufgabenstellungen

Tab. 3.1 gibt einen Überblick über typische räumliche und zeitliche Diskretisierungen bei den in Kapitel 1 angeführten Aufgabenstellungen.

Tab. 3.1 Typische raum-zeitliche Diskretisierung für Aufgabenstellungen der Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Aufgabenstellung	Ereignis/ kontinuierliche Modelle	Zeitliche Diskretisierung	Räumliche Diskretisierung	Nach- führung
Hochwasserbemessung	meist ereignisbasiert	Minuten bis Stunden	Kleine Gebiete: Vereinfacht Blockmodelle Größere Gebiete: Blockmodelle für Teilgebiete, halbverteilte Modelle, flächendetaillierte Modelle	nein
Kanaldimensionierung	meist ereignisbasiert	Minuten	Flächendetaillierte Abbildung des Kanalsystems	nein
Wasserbewirtschaftung	kontinuierliche Modelle	Stunden, Tage, Monate	je nach Aufgabenstellung	nein
Abflussvorhersage	meist kontinuierlich	Stunden	halbverteilte oder flächendetaillierte Modelle	ja
Risikoanalyse	meist ereignisbasiert	Minuten bis Stunden	Flächendetaillierte Modelle	nein
Analyse von Veränderungen	kontinuierliche Modelle	Stunden, Tage, Monate	Flächendetaillierte Modelle	nein
Grundlage für die Modellierung des Stofftransportes	kontinuierliche Modelle	Minuten bis Stunden	Flächendetaillierte Modelle	nein
Prozessverständnis	kontinuierliche Modelle	Minuten, Stunden, Tage	Flächendetaillierte Modelle	nein

3.3. Berechnungsansätze einzelner Prozesse in Niederschlag-Abfluss-Modellen

Die Niederschlag-Abfluss-Modelle mit unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Ausprägungen verwenden verschiedene Berechnungsansätze für Teilprozesse, die jeweils Vor- und Nachteile besitzen. Bei der Auswahl von Modellen soll daher Bedacht darauf genommen werden, wie die Teilprozesse im Modell abgebildet sind. Im Folgenden werden die Ansätze für die Teilprozesse nach drei Gruppen gegliedert diskutiert:

- Interzeption, Verdunstung und Schnee,
- Abflussbildung und
- Abflusskonzentration, Gerinnerouting.

Die erste Gruppe umfasst die hydrometeorologischen Randbedingungen der Modellierung. Die zweite Gruppe umfasst die Prozesse, die den gefallenen Niederschlag in Direktabfluss und Versickerung aufteilen. Die dritte Gruppe umfasst die Prozesse, die die zeitliche Verzögerung des Abfluss bei der Bewegung am Hang und im Gerinnesystem betreffen.

3.3.1. Interzeption, Verdunstung und Schnee

(a) Interzeption

Der gefallene Niederschlag, der auf Pflanzen zurückgehalten wird und verdunstet, bevor er den Boden erreicht, kann mithilfe eines Speichermodells beschrieben werden:

$$\frac{dS_{\text{int}}}{dt} = N_{\text{ZU}} - N_{\text{AB}} - V_{\text{int}}$$

bei dem S_{int} der Interzeptionsspeicher (Regen und Schnee), N_{ZU} bzw. N_{AB} der hinzukommende bzw. abtropfende Niederschlag und V_{int} die Interzeptionsverdunstung ist. Für die einzelnen Komponenten wurden von Rutter et al. (1977) Berechnungsansätze vorgeschlagen:

$$N_{\text{ZU}} = BG \cdot LAI \cdot N$$

$$N_{\text{AB}} = D_{\text{veg}} \cdot e^{b(S_{\text{int}} - S_{\text{int-max}})}$$

wobei BG der Bedeckungsgrad (Anteil der mit Vegetation bedeckter Fläche), LAI der Blattflächenindex (Leaf Area Index) und N der Niederschlag, D_{veg} und b Parameter zur Erfassung des Stammabflusses und $S_{\text{int-max}}$ der maximale Interzeptionsspeicher sind. Die Interzeptionsverdunstung wird als Funktion des Interzeptionsspeichers und der potenziellen Verdunstung angesetzt. Die Parameter hängen vom Bewuchs ab und unterliegen jahreszeitlichen Schwankungen.

Die Interzeption ist im Zusammenhang mit kontinuierlicher Modellierung dann relevant, wenn es häufig geringe Niederschläge mit Regenspauzen gibt. Während in den Tropen die Interzeptionsverdunstung bis zur Hälfte der Gesamtverdunstung betragen kann, liegt in Österreich der Anteil bei wenigen Prozent bis Zehnerprozent. Anstatt die Interzeption explizit durch einen Speicher zu modellieren, wird sie deshalb in vielen Modellen indirekt durch andere Modellteile abgedeckt. Bei Ereignismodellen sind das Anfangsverluste, bei kontinuierlichen Modellen ist das die Verdunstung. Für viele Fragestellungen in Österreich ist es deshalb nicht erforderlich, die Interzeption explizit durch Speicher zu modellieren. Für Prozessstudien kann eine explizite Beschreibung der Interzeption sinnvoll sein.

(b) Potenzielle Verdunstung

Unter potenzieller Verdunstung versteht man die Verdunstung, die auftritt, wenn der Boden bzw. die Pflanzen ausreichend mit Wasser versorgt sind. Bei trockenen Bedingungen ist die reale (oder aktuelle) Verdunstung kleiner. Die Referenzverdunstung (für feuchte Grasflächen mit bestimmten Eigenschaften) und die potenzielle Verdunstung (für eine bestimmte Vegetation) werden entweder gleichgesetzt, oder die letztere wird aus der ersteren durch Multiplikation mit einem Crop-Faktor (kc) berechnet.

Viele kontinuierliche Niederschlag-Abfluss-Modelle berechnen in einem ersten Schritt die potenzielle Verdunstung aus meteorologischen Messdaten und in einem zweiten Schritt die reale Verdunstung unter Verwendung der berechneten Bodenfeuchte. Die Berechnungsmethoden für die potenzielle Verdunstung unterscheiden sich in Hinblick auf die Datenerfordernisse, den anwendbaren Zeitschritt, ihre physikalische Basis und die Anwendungssituationen (DVWK 1996). Die gängigsten Verdunstungsgleichungen, die bei der Niederschlag-Abfluss-Modellierung Anwendung finden, sind in Tab. 3.2 zusammengestellt.

Tab. 3.2 Ausgewählte Ansätze zur Berechnung der potenziellen Verdunstung. Datenbedarf, Zeitskala und Anwendungsbereich. T: Temperatur, WG: Windgeschwindigkeit, Rn: Strahlungsbilanz, LF: Luftfeuchte, So: Sonnenscheindauer

	Datenbedarf					Zeitschritt Δt	Anwendung	Sonstiges
	T	WG	Rn	LF	So			
Dalton (1802)	X	X		X		Tage	Freie Wasseroberfläche	Beiwert abhängig von der Windgeschwindigkeit
Haude (1954, 1955, 1958)	X			X		für Monatsanwendung entwickelt, Tagesanwendung bedingt möglich	Potenzielle Verdunstung für Vegetation	Haude-Beiwert (orts- und vegetationsabhängiger, monatsvariabler Beiwert)
Penman (1948)	X	X	X	X		Tage, Stunden	Freie Wasseroberfläche	aerodynamischer Widerstand
Penman-Monteith (1965)	X	X	X	X		Tage, Stunden	Potenzielle Verdunstung für Vegetation	aerodynamischer Widerstand, Stomatawiderstand
Blaney-Cridde (1962)	X				X		Potenzielle Verdunstung für Vegetation	Sonnenscheindauer (orts- und datumsabhängig)
Priestley-Taylor (1972)			X			Tage, Stunden	Potenzielle Verdunstung für Vegetation	Vereinfachung des Penman-Ansatzes
Hamon (1963) (in Feder and Lash 1983; Lu et al. 2005)	X				X	Tage, Stunden bedingt möglich	Potenzielle Verdunstung für Vegetation	Tages-Sonnenscheindauer (orts- und datumsabhängig), orts-spezifische monatliche Korrekturwerte notwendig
Thornthwaite (1948)	X				X	Monatswerte	Potenzielle Verdunstung für Vegetation	Sonnenscheindauer (orts- und datumsabhängig)

Als typische Vertreter der Bandbreite von umfassenden bis zu vereinfachenden Ansätzen werden nachfolgend die Ansätze nach Penman-Monteith und Blaney-Cridde dargestellt.

Penman-Monteith-Methode: Diese Methode (Monteith 1965) ist ein detaillierter Ansatz zur Berechnung der potenziellen Verdunstung ET_{pot} . Obwohl zahlreiche meteorologische Parameter erforderlich sind, ist sie weit verbreitet, und wird auch von der FAO als Standardmethode empfohlen (Allen 1986; Allen et al. 1998). Neben der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit wird auch die Nettostrahlung R_n benötigt. Meist wird diese nicht gemessen, sondern aus anderen meteorologischen Kenngrößen abgeleitet (Allen et al. 1998).

$$ET_{pot} = \frac{1}{L^*} \cdot \frac{s \cdot (R_n - G) + \frac{\rho \cdot c_p}{r_a} \cdot (e_s(T) - e_a)}{s + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

Dabei ist L^* die spezifische Verdunstungswärme, s die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve, G der Bodenwärmestrom, ρ die Luftdichte, c_p die spezifische Wärme der Luft, e_s und e_a der Sättigungsdampfdruck und der aktuelle Dampfdruck der Luft und γ die Psychrometrikonstante. Zusätzlich ist die Kenntnis des pflanzenspezifischen aerodynamischen Widerstands (r_a) und des mittleren Stomatawiderstands des Bestandes (r_s) erforderlich. Die Entwicklung der Gleichung erfolgte auf Basis von Tageswerten (siehe Allen et al. 1998). Für feinere Zeitskalen

ist mit größeren Unsicherheiten zu rechnen (Walter et al. 2002; Allen et al. 2006). Der Ansatz ist beispielsweise im Modell WaSiM enthalten (siehe Kapitel 7.). Der Vorteil der Methode liegt in ihrer physikalischen Basis und den oft guten Ergebnissen, wenn die Eingangsgrößen gemessen werden. Klammrler und Fank (2014) berichten beispielsweise über gute Ergebnisse im unteren Murtal im Vergleich mit Lysimetermessungen. Der Nachteil liegt im großen Datenbedarf.

Blaney-Criddle-Methode: Dieser Ansatz (Blaney and Criddle 1950; Doorenbos und Pruitt 1992) benötigt für die Berechnung der potenziellen Verdunstung [mm/d] als Eingangsdaten nur die mittlere Tageslufttemperatur [°C], die maximale mögliche tägliche Sonnenscheindauer (S) und die Jahressonnenstunden (S_{Jahr}):

$$ET_{\text{pot}} = p \cdot (0,457 \cdot T_m + 8,128)$$

$$p = \frac{S_{\text{Tag}} \cdot 100}{S_{\text{Jahr}}}$$

Dieser oder ähnliche Ansätze sind beispielsweise in den Modellen Kampus und HQsim enthalten (siehe Kapitel 7.). Der Vorteil liegt im geringen Datenbedarf und der einfachen Handhabung. Parajka et al. (2003, 2005a) zeigen, dass sich mit diesem Ansatz die Wasserbilanz für österreichische Gebiete im Durchschnitt gut schließen lässt. Der Nachteil liegt in der geringeren Genauigkeit bei ungewöhnlichen Bedingungen und in kleinen Gebieten im Vergleich zu Penman-Monteith.

(c) Schneemodellierung

Zur Modellierung der Schneeprozesse wird der Schneevorrat im Gebiet bilanziert. Zum Schneevorrat trägt der feste Niederschlag bei. Flüssiger und fester Niederschlag wird i. A. durch einen Schwellenwert der Lufttemperatur unterschieden. Der feste Niederschlag wird meist mit einem Korrekturfaktor (Snow Correction Factor, SCF) multipliziert, um den systematischen Messfehler des Schneesniederschlags zu berücksichtigen. Ist in einem Gebiet ein Schneevorrat vorhanden, wird die Schneeschmelze aus meteorologischen Größen berechnet und in gleicher Weise im Abflussmodell behandelt wie der flüssige Niederschlag. Die Berechnung der Schneeschmelze kann durch Modellansätze unterschiedlicher Komplexität erfolgen, vom einfachen Gradtagverfahren bis zur komplexeren Energiebilanzmethode.

Energiebilanzmethode: Diese Methode berechnet die Energieflüsse an der Oberfläche der Schneedecke. Wenn die Summe aller Flüsse Q_m größer als 0 ist, wird daraus die Schneeschmelze pro Zeiteinheit berechnet. Die Energieflusskomponenten bestehen im Wesentlichen aus kurz- und langwelliger Strahlung (Q_{SW} und Q_{LW}), dem fühlbaren und latenten Wärmestrom (Q_S und Q_L) und dem Bodenwärmestrom (Q_B):

$$Q_m = Q_{SW} + Q_{LW} + Q_S + Q_L + Q_B$$

Ein wichtiger Parameter ist dabei die Albedo, das Verhältnis zwischen reflektierter und einfallender kurzwelliger Strahlung (Sonnenstrahlung). In den seltensten Fällen werden alle Komponenten gemessen; stattdessen werden sie als Funktion anderer meteorologischer Größen berechnet (Kirnbauer et al. 1994; Blöschl et al. 2002; Strasser et al. 2010; Parajka et al. 2012). Ein typischer Vertreter der Energiebilanzmethode ist das Modell SES (siehe Kapitel 7.).

Der Vorteil der Energiebilanzmethode liegt in ihrer physikalischen Basis. Allerdings ist die Methode nur so gut, wie nicht gemessene Komponenten aus anderen meteorologischen Größen bestimmt werden können. Bei Vorliegen detaillierter meteorologischer Daten ist diese Methode jedenfalls zu empfehlen (siehe z. B. Krajčič et al. 2017).

Gradtagverfahren (Temperaturindexverfahren): Bei diesem einfachen Verfahren wird die Lufttemperatur als Indikator für die Schneeschmelze verwendet:

$$M = GTF \cdot (T - T_{0,m}) \quad \text{für } T > T_{0,m}, \text{ sonst } M = 0$$

Die Schmelzrate M wird dabei proportional zur Lufttemperatur T über einer Grenztemperatur $T_{0,m}$ angesetzt. Der Gradtagfaktor (GTF) wird aus dem gemessenen Abfluss kalibriert. Mehrere Varianten des Verfahrens wurden entwickelt, die den Gradtagfaktor abhängig von der Jahreszeit und/oder Vegetation ansehen (z. B. Bergström 1992). Erweiterte Ansätze berücksichtigen zusätzlich den Einfluss von Wind (z. B. Schulla 2017) und Strahlung (z. B. Kleindienst 1996). Typische Vertreter dieses Ansatzes finden sich in kontinuierlichen Niederschlag-Abfluss-Modellen wie HQsim, WaSiM, HBV und Kampus (siehe Kapitel 7.).

Der Vorteil des Gradtagverfahrens besteht darin, dass nur die Lufttemperatur als Eingangsgröße erforderlich ist. Zudem wurde gezeigt, dass die Lufttemperatur mit mehreren Komponenten der Energiebilanz gut korreliert ist (Ohmura 2001), was die physikalische Interpretation erleichtert. Für ungewöhnliche Situationen wie Regen-auf-Schnee-Ereignisse ist das Gradtagverfahren allerdings nicht so gut geeignet und tendiert dazu, die Schneeschmelze zu unterschätzen (Braun 1984; Sui und Koehler 2001). Manche Modelle wie KAMPUS berücksichtigen diesen Umstand, indem sie einen höheren Gradtagfaktor für Regen-auf-Schnee-Ereignisse ansetzen (Blöschl et al. 2008a).

BOX 3.6: Interzeption, Verdunstung und Schnee

Für die meisten Anwendungen in Österreich ist es ausreichend, die Interzeption indirekt durch andere Modellteile abzudecken (Anfangsverluste bzw. Verdunstungsberechnung).

Es wird empfohlen, die Auswahl des Modells für die potenzielle Verdunstung nach der Datenlage zu treffen. Bei guter Datenlage wird Penman-Monteith empfohlen, ist nur die Lufttemperatur vorhanden, können Ansätze wie Blaney-Criddle verwendet werden. Die aktuelle Verdunstung wird in den meisten Modellen als Funktion der potenziellen Verdunstung und der Bodenfeuchte berechnet.

Wenn Messungen der Globalstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit zur Verfügung stehen und die zeitliche Auflösung des Modells Stunden oder weniger beträgt, wird die Energiebilanzmethode zur Schneemodellierung empfohlen, insbesondere in alpinen Gebieten. Bei einer zeitlichen Auflösung von Tagen oder bei fehlenden Klimadaten werden einfachere Ansätze auf Basis des Gradtagfaktors empfohlen.

3.3.2. Abflussbildung

Modellansätze zur Abflussbildung sind in der Literatur umfangreich dargestellt (z. B. Clausnitzer et al. 1998; Chahinian 2005). Hier wird unterschieden in

- physikalische basierte Ansätze,
- konzeptionelle Ansätze und
- vereinfachte Verlustratenansätze.

(a) Physikalisch basierte Ansätze

Die nachfolgend vorgestellten Ansätze nach Richards bzw. Green und Ampt gehören der Gruppe der physikalisch basierten Ansätze an.

Richards-Gleichung: Die Richards-Gleichung (Richards 1931) stellt eine Kombination der Darcy-Gleichung und der Kontinuitätsgleichung dar, mit dem Ziel, die vertikale Wasserbewegung im ungesättigten Boden zu erfassen.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k_u(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

θ ist der Wassergehalt, t die Zeit, z die vertikale Koordinate, k_u die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit und ψ die Saugspannung. k_u und ψ sind eine Funktion des Wassergehalts. Die Gleichung wird i. d. R. numerisch gelöst. Die Modelle Mike SHE und WaSiM verwenden diesen Ansatz (siehe Kapitel 7.).

Der Vorteil des Ansatzes ist seine physikalische Basis. Allerdings beschreibt er nur die Wasserbewegung in der Bodenmatrix, während er die Wasserbewegung in den Makroporen nicht beschreibt, die jedoch meist viel wichtiger für die Abflussbildung ist. Makroporen können getrennt oder durch effektive Parameter beschrieben werden (Zehe et al. 2007). Als Eingangsdaten sind die ungesättigte Leitfähigkeit und die Saugspannungskurven in jedem Rechenelement erforderlich, die selten zur Verfügung stehen. Deswegen sind typische Einsatzfelder eher die Grundwasserneubildungen und Transportvorgänge als die Abflussmodellierung selbst.

Green-und-Ampt-Verfahren: Dieses Verfahren (Green und Ampt 1911; Mein and Larson 1973) kombiniert ebenfalls die Darcy-Gleichung und die Kontinuitätsgleichung, allerdings unter der Annahme einer rechteckigen Feuchtefront und mit dem Ziel, die Infiltrationsrate zu berechnen.

$$F(t) + \psi \Delta \theta \ln \left(1 - \frac{F(t)}{\psi \Delta \theta} \right) = kt$$

Dabei ist F das bis zum Zeitpunkt t infiltrierte Wasservolumen und $\Delta \theta$ ist die Differenz zwischen Sättigungsfeuchte θ_s und Anfangsbodenfeuchte θ_o . Für die Anwendung sind die Leitfähigkeit k , die Saugspannung ψ an der Feuchtefront sowie θ_s und θ_o erforderlich. Letztere ist von der Vorgeschichte (Niederschlag, Verdunstung) abhängig. HEC-HMS hat diesen Ansatz als eine Auswahlmöglichkeit enthalten (siehe Kapitel 7.).

Der Vorteil des Verfahrens besteht in seiner physikalischen Basis und der numerisch wesentlich einfacheren Handhabung im Vergleich zur Richards-Gleichung. Zudem wurden die erforderlichen Green-Ampt-Parameter bei trockenem Boden für verschiedene Bodenklassen aus umfangreichen Messungen tabelliert (Rawls et al. 1983). Allerdings berücksichtigt auch dieses Verfahren Makroporen nicht direkt, somit müssen sie als effektive Parameter oder explizit berücksichtigt werden. Zu berücksichtigen ist auch, dass das Green-Ampt-Verfahren nur die Abflussbildung zufolge Infiltrationsüberschuss (infiltration excess, Sättigung von oben) beschreibt, nicht hingegen Abflussbildung zufolge Sättigungsüberschuss (saturation excess, Sättigung von unten) oder Interflow (Zwischenabfluss), die in Österreich besonders bei länger anhaltendem Regen wichtiger sein können.

BOX 3.7: Physikalisch basierte Ansätze der Abflussbildung

Es wird empfohlen, dass die physikalisch basierten Modelle (Richards-Gleichung, Green-Ampt) nur verwendet werden, wenn bodenphysikalische Informationen vor Ort vorliegen und die Bearbeiter entsprechend geschult sind. Modelle, die nur den Matrixfluss beschreiben, sind nicht zu empfehlen, da fast immer die Makroporenflüsse für den Abflussprozess wichtig sind. Manche Modelle berücksichtigen einen Bypass zur Modellierung des Wasserflusses in den Makroporen.

(b) Konzeptionelle Ansätze

Horton's-Methode: Diese nimmt an, dass die Infiltrationsrate $i(t)$ exponentiell mit der Ereignisdauer t abnimmt und einer Endinfiltrationsrate i_0 zustrebt:

$$i(t) = i_0 + (i_1 - i_0) \cdot e^{-kt}$$

i_1 ist die Anfangsinfiltrationsrate und k ist ein Kalibrierparameter. IHK und Blue M verwenden diesen Ansatz (siehe Kapitel 7.). Der Vorteil besteht in der Einfachheit der Gleichung, doch hat sie keine physikalische Basis und die Parameter lassen sich nicht leicht bestimmen.

Konzept der abflussbeitragenden Fläche: Dieses Konzept nimmt an, dass der zum Abfluss beitragende Anteil des Niederschlags mit dem Feuchtezustand des Gebiets zunimmt (Hewlett and Hibbert 1967). Dieser Zusammenhang kann durch eine Zunahme der Ausdehnung von Sättigungsflächen mit fortschreitender Niederschlagsdauer räumlich interpretiert werden (Roger et al. 2013). Er ist die Basis für viele kontinuierliche Modelle. Typischerweise wird die funktionale Form des Zusammenhangs durch das Modell vorgegeben. In HQsim wird beispielsweise eine arctan-Funktion angenommen, in HBV hingegen eine Potenzfunktion (Abb. 3.6) (Kleindienst 1996; Bergström 1992). Die Parameter des Zusammenhangs (z. B. beta für die Potenzfunktion) werden kalibriert und können bei flächendetaillierten und halbverteilten Modellen innerhalb eines Gebietes variieren.

Der Vorteil des Ansatzes besteht in seiner Robustheit, einer oft guten Simulationsqualität und einer hydrologisch sinnvollen Interpretation. Allerdings enthält der Zusammenhang Kalibrierparameter, die aus dem Abfluss zurückgerechnet werden müssen. Ein Zusammenhang mit Gebietskenngrößen wie Bodentyp und Bewuchs ist nicht leicht ableitbar (Merz und Blöschl 2004).

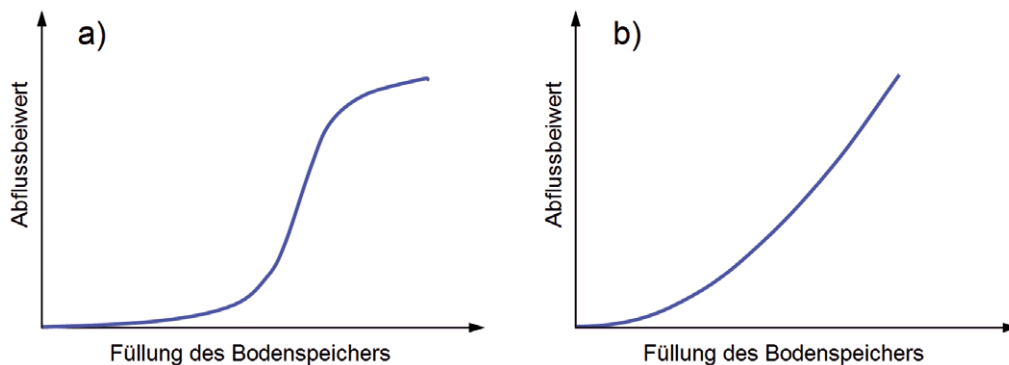


Abb. 3.6 Beispiele für den Zusammenhang von aktuellem Abflussbeiwert (Anteil des zum Abfluss kommenden Niederschlags) und dem Bodenwassergehalt: (a) arctan-Funktion aus HQsim (Kleindienst 1996), (b) Potenzfunktion in HBV (Bergström 1992)

Soil-Conservation-Service-Methode (SCS): Diese Methode (SCS-USDA 1972) nimmt an, dass für ein Ereignis das Verhältnis zwischen tatsächlicher und möglicher Versickerung gleich dem Verhältnis zwischen tatsächlichem und möglichem Abfluss ist. Damit lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem Effektivniederschlag N_{eff} (bzw. Direktabflussvolumen) und dem Niederschlag N für ein Ereignis ableiten.

$$N_{eff} = \frac{(N - 0,25 \cdot S)^2}{N + 0,8 \cdot S}$$

Die Bodenrückhaltekapazität S wird durch die Kurvennummer CN ($0 < CN < 100$) dargestellt.

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

Die *CN* liegt tabelliert als Funktion von Versickerungsvermögen, Bodennutzung und Bodenfeuchte zu Beginn des Ereignisses (ausgedrückt als Vorregenindex) vor. Ähnliche Verfahren wurden in Deutschland entwickelt (z. B. Anderl 1975). Typische Vertreter des Ansatzes sind das IHK- und HEC-HMS-Modell (siehe Kapitel 7.).

Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass der Direktabfluss eines Ereignisses auch ohne Messung des Abflusses einfach aus dem Niederschlag berechnet werden kann. Allerdings zeigten Merz et al. (2006), dass die in der Literatur vorhandenen Tabellen der *CN* für Österreich ungeeignet sind. Beispielsweise geht das Verfahren bei Waldgebieten wegen hoch durchlässiger Böden von kleinen Abflussbeiwerten aus. In Österreich besitzen aber Waldgebiete wegen der großen Niederschläge und der damit verbundenen hohen Grundwasserstände oft große Abflussbeiwerte. Daraus ergibt sich, dass die Tabellen für *CN* der Literatur nicht für Österreich verwendet werden sollen. Die Struktur der Gleichung ist aber für österreichische Verhältnisse geeignet, sofern *CN* aus Abflussmessungen bestimmt wird (im Gebiet selbst oder in hydrologisch ähnlichen Gebieten, wenn lokal keine Abflussmessungen vorliegen) (siehe Kapitel 4.).

Konzept der zeitlichen Abflussbeiwertentwicklung: Dieses für Ereignisse entwickelte Konzept (Markart et al. 2004; Kohl 2011) nimmt an, dass der Abflussbeiwert im Verlauf des Ereignisses zunimmt. Es basiert auf etwa 700 Starkregenexperimenten zur Charakterisierung des Abflussverhaltens alpiner Vegetations-/Bodenkomplexe (Abb. 3.7). Auf dieser Basis entwickelten Markart et al. (2004) eine „Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes alpiner Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen“. Hydrologische Reaktionseinheiten werden dabei hinsichtlich ihres Effektivregens (Abfluss) unter normierten Regenbedingungen im Zustand der Abflusskonstanz bewertet. Dadurch wird eine von Vorbedingungen unabhängige Vergleichbarkeit der hydrologischen Eigenschaften unterschiedlicher Flächen ermöglicht. Weitere Auswertungen der Experimente erlauben eine prozessnahe Modellierung der zeitlichen Abflussbeiwertentwicklung über die spezifischen Anfangsverluste (Initialabstraktion) und die Intensitätsabhängigkeit des Abflussbeiwerts. Die Methode ist im ZEMOKOST-Modell implementiert (siehe Kapitel 7.).

Der Vorteil besteht darin, dass die Abflussreaktion basierend auf einer großen Anzahl von Feldexperimenten berechnet wird und damit eine große Zuverlässigkeit gegeben ist. Allerdings sind für die Anwendung Feldbegehungen erforderlich, um die Abflusswirksamkeit von Flächen einzuschätzen. Damit ist es vorwiegend für kleine, alpine Gebiete geeignet.



Abb. 3.7 Beregnungsexperiment und Oberflächenabfluss: Fläche 100 m², Regenintensität 100 mm/h (Quelle: Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft – BFW)

BOX 3.8: Konzeptionelle Ansätze der Abflussbildung

Es wird empfohlen, konzeptionelle Infiltrationsansätze dort zu verwenden, wo Daten zur physikalischen Charakterisierung des Bodens nicht vorhanden sind (z. B. für große Gebiete).

Für kontinuierliche Modelle stellt das Konzept der abflussbeitragenden Flächen ein Standardkonzept dar, das sich bewährt hat. In Modellen kommen verschiedene funktionale Zusammenhänge zwischen Bodenfeuchte und Abflussbildung zur Anwendung.

Für Ereignismodelle können SCS-CN, Horton und das Konzept der zeitlichen Abflussbeiwertentwicklung verwendet werden. Allerdings sind die Ergebnisse wesentlich von der geeigneten Parameterwahl abhängig. Für die Horton-Methode ist die Bestimmung der Parameter meist problematisch. Für das SCS-CN-Verfahren gilt, dass die Form der Gleichung gut geeignet ist, die Kurvennummern jedoch nicht auf Basis von Böden und Landnutzung bestimmt, sondern an den gemessenen Abfluss angepasst werden sollen. Das Konzept der zeitlichen Abflussbeiwertentwicklung (ZEMOKOST) wird für kleine, alpine Einzugsgebiete empfohlen.

(c) Vereinfachte Verlustratenansätze

Vereinfachte Berechnungsmethoden für Verlustraten bzw. Abflussbeiwertansätze wurden für die Ereignismodellierung konzipiert. Dabei wird die Ganglinie des Effektivniederschlags aus dem Niederschlag durch Abzug von Verlusten (Versickerungsrate) oder durch einen Abflussbeiwert ermittelt. Verschiedene funktionale Formen für die Zeitabhängigkeit der Verluste bzw. Abflussbeiwerte sind traditionell in Verwendung. Sie basieren auf einem angenommenen Verhalten der Abflussbildung ohne physikalische oder experimentelle Basis. Prozesse wie Verdunstung und Interzeption werden dabei oft auch als berücksichtigt angesehen. Zu den Methoden zählen die folgenden:

Konstante Verlustrate (ϕ) – Indexmethode: Der Verlust wird als konstant (zeitunabhängig) angenommen.

Abflussbeiwert (ψ) – ereignisbezogen: Der Abfluss wird als Produkt von Niederschlag und Abflussbeiwert angenommen. Die Methode wird häufig für Gebiete mit hohem Versiegelungsgrad verwendet.

Abflussbeiwert (ϕ) – Prozentwertmethode: Neben dem Ereignisabflussbeiwert kommt auch der Abflussbeiwert (ϕ) der Prozentwertmethode häufig zum Einsatz. Dabei wird, meist nach der Anwendung eines Anfangsverlusts, ein fester Prozentwert des verbleibenden Niederschlags zum Abfluss gebracht. Für natürliche Einzugsgebiete liegt der Anfangsverlust zwischen 5 und 15 mm (Maniak 2010), in der Siedlungswasserwirtschaft sind < 2 mm Verlusthöhe zu erwarten.

Die Modelle IHK, Blue M und CityDrain verwenden derartige Ansätze (siehe Kapitel 7.). Vereinfachte Verlustratenansätze haben eine lange Tradition in der Hydrologie. Der Vorteil besteht in ihrer einfachen Handhabung. Der Nachteil ist, dass sie weder eine physikalische noch experimentelle Basis besitzen. Welcher der Ansätze zur Anwendung kommt, ist deshalb eine A-priori-Entscheidung, die in der Regel kaum überprüfbar ist. Die Parameter erfordern eine Kalibrierung am Abfluss und sind damit gebiets- und ereignisspezifisch.

BOX 3.9: Vereinfachte Verlustratenansätze der Abflussbildung

Vereinfachte Verlustratenansätze werden manchmal für städtische Einzugsgebiete und für kurze intensive Regen in natürlichen Einzugsgebieten angewendet. Wegen der fehlenden konzeptionellen/experimentellen Basis erfordern sie stets eine Kalibrierung am Abfluss, und die Übertragbarkeit zwischen Ereignissen und Gebieten ist meist nicht gegeben.

Für Simulationen in größeren Gebieten mit teils länger andauernden Regenereignissen werden Verlustratenansätze nicht empfohlen, sondern konzeptionelle Ansätze.

3.3.3. Abflusskonzentration und Gerinnerouting

Die Abflusskonzentration beschreibt das Abfließen des lokal gebildeten Abflusses am Hang und im Gewässernetz eines Gebiets. Für größere Gerinne kann dieses Abfließen auch explizit durch Gerinnerouting beschrieben werden. In beiden Fällen werden die Speicherungs- und Translationsvorgänge abgebildet. Hier wird unterschieden zwischen

- physikalisch basierten Ansätzen sowie
- konzeptionellen und Black-Box-Ansätzen.

(a) Physikalisch basierte Ansätze

St.-Venant'sche Gleichungen: Diese Gleichungen (de Saint-Venant 1871) bestehen aus dem Impulssatz und der Kontinuitätsgleichung und beschreiben den Abfluss im Gerinne und den Oberflächenabfluss am Hang. Je nach Anwendung können verschiedene Vereinfachungen (kinematische, diffusive oder dynamische Welle) herangezogen werden. Zur Beschreibung der Sohlreibung sind zusätzlich empirische Gleichungen erforderlich, die die Fließgeschwindigkeit v_m als Funktion anderer Größen ausdrücken. Dafür kann die Stricklergleichung herangezogen werden

$$v_m = k_{ST} \cdot R^{2/3} \cdot I_e^{1/2}$$

wobei k_{st} der Stricklerbeiwert ist, der die Rauigkeit beschreibt, R der Hydraulische Radius und I_e das Energieliniengefälle. Für steile Gerinne in Wildbächen wird manchmal die Gleichung nach Rickenmann (1996) herangezogen

$$v_m = 0,37 \cdot g^{0,33} \cdot Q^{0,34} \cdot I^{0,2} \cdot d_{90}^{-0,35}$$

wobei g die Erdbeschleunigung, Q der Abfluss, I die Gerinneneigung und d_{90} ein charakteristischer Korndurchmesser sind. Typische Vertreter von Niederschlag-Abfluss-Modellen, die die St.-Venant-Gleichungen verwenden, sind HEC-HMS, HQsim, WaSiM, SWMM, Mike-Urban und Hystem-Extran (siehe Kapitel 7.).

Der Vorteil der St.-Venant'schen Gleichungen ist ihre physikalische Basis, wodurch auch ausufernde Abflüsse berechnet werden können. Allerdings sind die Gleichungen für die Sohlreibung streng genommen nicht für instationäre Verhältnisse geeignet und die Rauigkeiten (k_{st}) können sich mit dem Wasserstand ändern. Die genaue Geometrie des Gerinnes bzw. des Hangs muss bekannt sein. Das Verfahren kann rechenaufwendig sein, und auf stabile numerische Lösungen ist zu achten.

(b) Konzeptionelle und Black-Box-Ansätze

Einheitsganglinie/UH (Unit Hydrograph): Die Methode (Sherman 1932) beschreibt den zeitverzögerten Transfer des Effektivniederschlags zum Abfluss (d. h. die Abflusskonzentration am Hang und im Gerinnesystem). Ausgangspunkt ist die Definition einer typischen Abflussreaktion (Einheitsganglinie) auf einen Niederschlag der Größe 1 und der Dauer Δt . Diese

wird aus beobachteten Abflussereignissen rückgerechnet. Mithilfe eines diskretisierten Faltungsintegrals werden Effektivniederschläge mit unterschiedlichem zeitlichen Verlauf in den Abfluss umgesetzt. Die Einheitsganglinie ist eine traditionelle Methode für die Berechnung von Ereignisabflussganglinien für die Hochwasserbemessung. Typische Modelle sind IHK und HEC-HMS (siehe Kapitel 7).

Der Vorteil des Verfahrens ist seine leichte Handhabbarkeit und seine Nachvollziehbarkeit für Gebiete, an denen Abflussmessungen vorliegen. Zu den Nachteilen zählt die Annahme der Linearität, d. h., dass kleine und große Niederschläge die gleiche Form der Abflussganglinie hervorrufen. Das ist i. A. nicht der Fall, denn die Abflussreaktion wird meist schneller und die Wellenanstiege werden mit zunehmender Ereignisgröße steiler. Dies hängt mit dem Fließverhalten am Hang und im Gerinne (siehe Stricklergleichung) zusammen. Bei der Extrapolation auf große Ereignisse sollte diese Beschleunigung berücksichtigt werden. Die Einheitsganglinie wird i. d. R. in Verbindung mit Blockmodellen verwendet, bei denen die räumliche Niederschlagsverteilung nicht berücksichtigt wird. Zudem ist die Übertragbarkeit auf Gebiete ohne Abflussmessungen problematisch, da meist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Gebietseigenschaften und der Einheitsganglinie ableitbar ist.

Zeitflächendiagramm/Isochronenmethode: Das ist eine Alternative zur Einheitsganglinie. Mittels empirischer hydraulischer Ansätze werden in einer Kartendarstellung des Einzugsgebiets Linien gleicher Laufzeit bis zum Gebietsauslass definiert (Isochronen). Die Flächen zwischen den Linien dienen zur Erstellung einer der Einheitsganglinie ähnlichen Funktion, mit der der Effektivniederschlag in den Abfluss mithilfe eines Faltungsintegrals umgelegt werden kann. Die Laufzeiten werden oft als Konzentrationszeit (t_c) definiert. Ein typisches Modell ist KAREN (siehe Kapitel 7.).

Der Vorteil besteht in der einfachen Handhabung und der Möglichkeit, die Berechnung ohne Abflussmessungen durchzuführen. Allerdings wird wiederum die Annahme der Linearität getroffen. Mit den üblichen empirischen hydraulischen Ansätzen ist die Verzögerung im Vergleich zu beobachteten Abflussereignissen meist zu gering.

Linearspeicher: Dies ist im Prinzip eine weitere Alternative zur Einheitsganglinie, bei der ein linearer Zusammenhang zwischen dem im Gebiet gespeicherten Wasservolumen V und dem Abfluss Q angenommen wird.

$$Q(t) = \frac{1}{K} \cdot V(t)$$

K ist der Speicherparameter. Durch Kombination mit der Kontinuitätsgleichung ergibt sich eine Differenzialgleichung, die analytisch gelöst werden kann. Der Linearspeicher bildet einzelne Komponenten in vielen Niederschlag-Abfluss-Modellen ab.

Der Vorteil besteht in der einfachen Handhabung und der Beschreibung der Abflusskonzentration durch einen einzigen Modellparameter (K), allerdings sind beobachtete Wellenformen meist komplexer. Deshalb wird der Linearspeicher zumeist als Baustein von weiterführenden Methoden verwendet und selten als alleiniges Modell.

Linearspeicherkaskade/Nash-Kaskade: Mit dieser Methode (Nash 1957) wird meist der Wellenablauf im Gerinne beschrieben. Dabei handelt es sich um eine Aneinanderreihung von linearen Einzelspeichern. Der Ausfluss eines Speichers dient als Zufluss zum nächsten Speicher. Dadurch ist es möglich, verschiedene Formen der Abflussverzögerung zu modellieren. Neben dem Speicherparameter K wird die Anzahl der Speicher n als zweiter Parameter eingeführt, was eine bessere Kalibrierbarkeit ermöglicht. Der Ansatz wird in vielen Modellen verwendet.

Der Vorteil besteht in der einfachen Handhabung und der Beschreibung der Abflusskonzentration durch nur zwei Modellparameter. Zwar handelt es sich um einen linearen Ansatz, doch gibt es Erweiterungen, die die Nicht-Linearität beschreiben und sich in der Praxis bewährt

haben (Reszler et al. 2008a). Wie bei den anderen Modellen der Abflusskonzentration ist eine Kalibrierung an den beobachteten Abfluss erforderlich.

Muskingum-Methode: Diese ist eine Alternative zur Linearspeicherkaskade, welche den Hochwasserablauf in einem Gerinne für langsam ansteigende Wellen und ohne Rückstau beschreibt. Das Speichervolumen im Gerinne wird als lineare Funktion des Abflusses am oberen und am unteren Rand der Gerinnestrecke angesetzt (Q_Z und Q_A):

$$V(t) = K \cdot [X \cdot Q_Z(t) + (1-X) \cdot Q_A(t)]$$

Die Modellparameter sind der Speicherparameter K und der Dämpfungsparameter X . Bei $X = 0,5$ erfolgt eine ungedämpfte Translation der Abflusswelle, bei $X = 0$ erfolgt der Abfluss analog zum Linearspeicher. Typische Modelle sind HEC-HMS, IHK, CityDrain und HQsim (siehe Kapitel 7.).

Der Vorteil besteht in der einfachen Handhabung und der Beschreibung der Abflusskonzentration durch nur zwei Modellparameter. Es ist ein lineares Verfahren und erfordert Kalibrierung am beobachteten Abfluss.

Level-Pool-Methode: Damit wird die Verzögerung des Abflusses durch einen See (meist Stausee) beschrieben. Für die Anwendung des Verfahrens müssen die Beckeninhaltslinie (Abb. 3.8a) und eine eindeutige Wasserstands-Durchfluss-Beziehung des Beckenauslasses (Abb. 3.8b) bekannt sein. Die Kombination dieser beiden Funktionen mit der Kontinuitätsgleichung ergibt eine Differenzialgleichung, die numerisch gelöst und damit die Zuflussganglinie zum See (Abb. 3.8c) in die Ausflussganglinie transformiert werden kann. Die Methode wird in HQsim und CityDrain verwendet (siehe Kapitel 7.).

Da die Methode sonst keine Annahmen trifft und für praktische Fälle die erforderlichen Informationen meist mit guter Genauigkeit bekannt sind, ist die Methode für die Berechnung der Verzögerung des Abflusses durch einen See jedenfalls zu empfehlen.

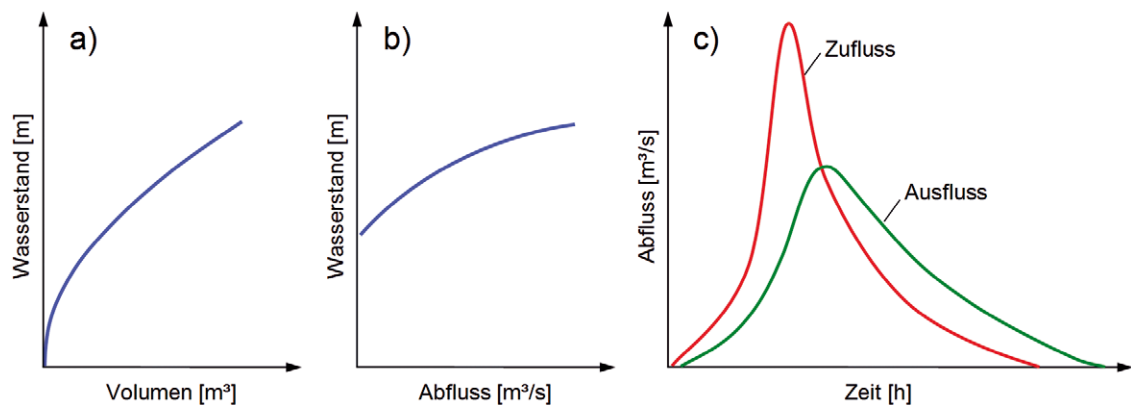


Abb. 3.8 (a) Beckeninhaltslinie, (b) Wasserstands-Durchflussbeziehung, (c) Verzögerte Abflussganglinie berechnet mittels der Level-Pool-Methode

BOX 3.10: Abflusskonzentration und Gerinnerouting

Für die Abflusskonzentration kommen meist konzeptionelle oder Black-Box-Ansätze zur Anwendung. Dabei ist zu beachten, dass die Nichtlinearitäten abgebildet werden, besonders die Beschleunigung der Abflusswellen bei Zunahme der Ereignisgröße.

Für das Gerinnerouting werden die St.-Venant'schen Gleichungen (oder geeignete Vereinfachungen) empfohlen, falls Wasserstände von Interesse sind, Rückstauereffekte relevant sind oder Änderungen in der Geometrie berücksichtigt werden sollen. In den anderen Fällen werden die rechentechnisch einfacheren konzeptionellen oder Black-Box-Ansätze empfohlen (Linearspeicherkaskade, Muskingum etc.), wobei Abflussdaten für die Kalibrierung erforderlich sind. Dabei sind Nichtlinearitäten zu berücksichtigen. Im Alpenvorland bei langen Strecken mit relativ geringem Gefälle ist eine Überprüfung der Laufzeiten und Retention mit Naturmessungen oder einem hydraulischen Modell zu empfehlen.

Für Seeretention ist die Level-Pool-Methode jedenfalls zu empfehlen.

3.3.4. Typische Berechnungsansätze nach Aufgabenstellungen

Tab. 3.3 gibt einen Überblick über typische Berechnungsansätze bei den in Kapitel 1. angeführten Aufgabenstellungen. Wichtig dabei ist, dass der Bearbeiter Sachverständnis für das verwendete Modell mitbringt. Ein bekanntes Modell, für das Erfahrungswerte über das Modellverhalten existieren und Parameter eingeschätzt werden können, ist dabei von Vorteil. Die verwendeten Modellansätze richten sich zudem nach den zur Verfügung stehenden Daten. Betreffend die Wahl der Modellparameter wird auf Kapitel 4. verwiesen.

Tab. 3.3 Typische Berechnungsansätze für Aufgabenstellungen der Niederschlag-Abfluss-Modellierung: – kaum verwendet, (x) manchmal verwendet, x häufig verwendet

Aufgabenstellung	Interzeption, Verdunstung, Schnee			Abflussbildung			Abflusskonzentration		Gerinnerouting	
	Interzeption	Verdunstung	Schnee	Physikalisch	Konzeptionell	Vereinfacht	Physikalisch	Konzeptionell	Physikalisch	Konzeptionell
Hochwasserbemessung	–	–	(x)	–	x	(x)	–	x	x	x
Kanaldimensionierung	–	–	(x)	–	x	x	–	x	x	x
Wasserbewirtschaftung	(x)	x	x	–	x	–	–	(x)	(x)	x
Abflussvorhersage	–	x	x	–	x	–	–	x	x	x
Risikoanalyse	–	x	x	(x)	x	–	(x)	x	x	x
Analyse von Veränderungen	(x)	x	x	(x)	x	–	(x)	x	x	x
Grundlage für die Modellierung des Stofftransportes	–	(x)	(x)	x	(x)	–	x	x	x	(x)
Prozessverständnis	x	x	x	x	(x)	–	x	–	x	(x)

4. Wahl der Modellparameterwerte

4.1. Typen von Modellparametern und ihre Messbarkeit

Wie jedes Modell stellt ein hydrologisches Modell ein vereinfachtes Abbild der Realität dar. Es beschreibt verschiedene hydrologische Prozesse anhand mathematischer Gleichungen. Parameter sind die Koeffizienten in den Modellgleichungen, die so zu wählen sind, dass das Modell die jeweilige, lokale Situation passend beschreibt.

Die Parameter können manchmal direkt gemessen werden. In vielen Fällen ist das allerdings nicht möglich. Man hilft sich dann mit einem Vergleich der Modellantwort (berechneter Abfluss) mit den Messdaten (gemessener Abfluss), um daraus die Parameter zu erschließen. Diesen Vorgang nennt man Kalibrierung. Bei einer Kalibrierung werden die Parameter – im plausiblen Rahmen – so lange variiert, bis eine bestmögliche Deckung der simulierten Größen mit der Zielgröße, z. B. Abflussdaten an einem Pegel, erzielt wird. Der Kalibrierungsvorgang erfolgt in der Regel iterativ und inkrementell und kann unter Verwendung von Güteindikatoren als Optimierungsproblem angesehen werden. Generelles Ziel der Kalibrierung ist die Verringerung systematischer Fehler, die aufgrund der Modellstruktur oder aber auch aufgrund von Fehlern in den Eingangsdaten auftreten können.

Nach der Kalibrierung der Parameter ist das Modell noch nicht für die Anwendung einsetzbar, denn es muss noch validiert werden, und zwar mit Daten und Informationen, die nicht für die Kalibrierung verwendet wurden. Die Validierung wird in Kapitel 5.1. beschrieben.

Liegen keine Messungen des Abflusses vor (unbeobachtete Einzugsgebiete), sind Alternativen zur Kalibrierung erforderlich. Dieses Kapitel empfiehlt dafür eine systematische Herangehensweise. Ausgehend von einer umfangreichen Gebietskenntnis, abgesichert durch Begehungen und Feldversuche, und der Analyse der in einem Gebiet vorherrschenden dominanten hydrologischen Prozesse sollen Plausibilitätsprüfungen unter Einbeziehung von zahlreichen unterschiedlichen, einander ergänzenden Informationen und hydrologischem Expertenwissen durchgeführt werden.

Je nach Modellkonzept für die einzelnen hydrologischen Prozesse (siehe Kapitel 3.3.) werden in diesem Regelblatt die Parameter eingeteilt in

- physikalisch basierte Parameter (genaue physikalische Definition und im Prinzip messbar),
- konzeptionelle Parameter (mit hydrologischer Modellvorstellung verbunden, nicht direkt messbar) und
- Black-Box-Parameter (reine Kalibriergrößen ohne hydrologische Modellvorstellung, nicht messbar).

(i) Physikalisch basierte Parameter: Parameter, die in physikalisch-basierten Gleichungen enthalten sind (z. B. die Albedo in der Energiebilanz, die hydraulische Leitfähigkeit in der Darcy-Gleichung, die Rauigkeit in den St.-Venant'schen Gleichungen) sind im Prinzip messbar. In der Praxis tritt aber die Schwierigkeit auf, dass sie meist nur an wenigen Punkten in einem Einzugsgebiet gemessen werden können. Die Zahl der Punkte ist in den seltensten Fällen ausreichend, um die hohe räumliche Variabilität der Parameter zu erfassen. Bodenparameter wie Bodentiefen, hydraulische Leitfähigkeiten, Feldkapazität etc. zeigen eine äußerst hohe räumliche Variabilität. Hydraulische Leitfähigkeiten können beispielsweise in wenigen Metern Abstand um Zehnerpotenzen variieren. Abb. 4.1 zeigt ein Beispiel der Variabilität von gemessenen Leitfähigkeiten (k_f -Werte) mehrerer Stechzylinderproben und Tiefenstufen eines Bodenprofils. Durch die hohe Variabilität gestaltet sich die Übertragung der Punktinformation in die Fläche problematisch. Dabei spricht man vom Skalenproblem (Beven 1989; Blöschl 1996a). Bei bodenphysikalischen Untersuchungen kommt hinzu, dass diese häufig unter Laborbedingungen durchgeführt werden und eine Übertragbarkeit auf die natürlichen Verhältnisse oft nicht möglich ist, da beispielsweise der Makroporenfluss im Labor nicht im gleichen Ausmaß gegeben ist wie in der Natur. Neben dem großem logistischen Aufwand sind aus all

diesen Gründen Feldmessungen physikalisch basierter Parameter oft nicht repräsentativ für das hydrologische Modell, und es ist zusätzlich eine Kalibrierung am gemessenen Abfluss erforderlich, um zutreffende Abflusssimulationen zu erhalten. Das Gleiche gilt, wenn derartige Parameter aus Proxydaten abgeleitet werden (wie z. B. die Leitfähigkeiten aus der Kornverteilung des Bodens, siehe Kapitel 4.3.3.).

(ii) Konzeptionelle Parameter: Parameter, die mit einer hydrologischen Modellvorstellung verbunden sind (z. B. Speicherkoeffizienten, Ereignisabflussbeiwert, Konzentrationszeit, Gradtagfaktor, Bewertung hochwasserrelevanter Flächen nach dominanten Abflussprozessen), sind nicht lokal messbar, da sie auf der Hydrotop- bzw. Einzugsgebietsebene definiert sind. Sie werden i. d. R. aus dem gemessenen Abfluss rückgerechnet. Oft erfolgt dies unter Zuhilfenahme anderer Informationen über das Gebiet (Vegetation, Landnutzung, Boden, Geologie) und mit hydrologischem Expertenwissen unter Berücksichtigung von Feldbegehungen. Für die praktische Anwendung ist das eine wichtige Parameterkategorie.

(iii) Black-Box-Parameter: Das sind reine Kalibriergrößen ohne hydrologische Modellvorstellung (z. B. die Ordinaten der Einheitsganglinie, Verlustratenansätze). Diese Parameter sind klarerweise nicht lokal messbar und werden aus dem gemessenen Abfluss rückgerechnet. Die Verwendung von Zusatzinformation und Expertenwissen gestaltet sich wegen der fehlenden hydrologischen Interpretierbarkeit schwieriger.

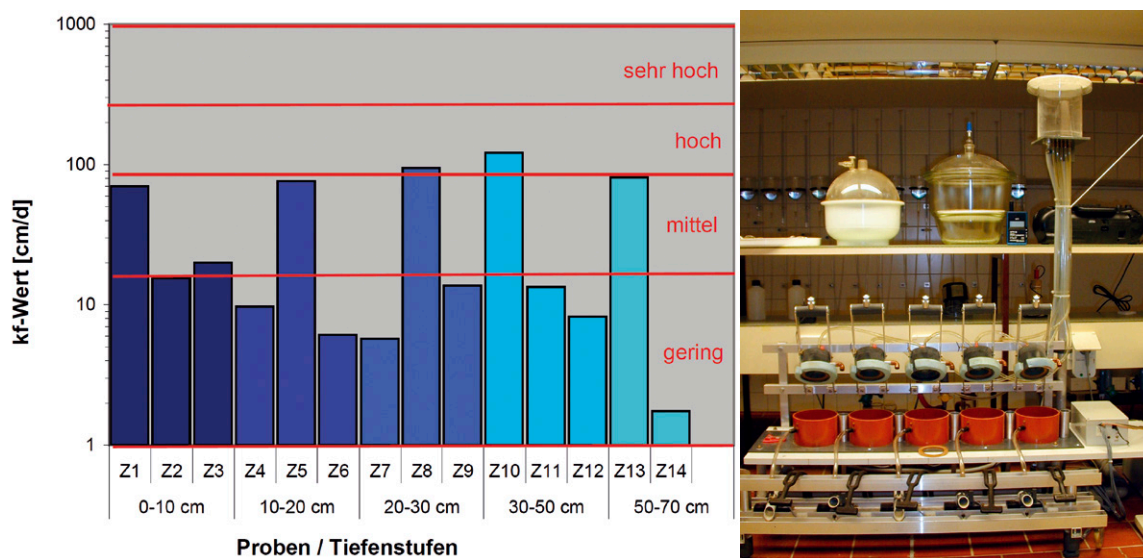


Abb. 4.1 Links: Variabilität von gemessenen hydraulischen Leitfähigkeiten (*kf*-Werte) mehrerer Stechzylinderproben und Tiefenstufen eines Bodenprofils. Rechts: Anlage zur Messung von *kf*-Werten an Stechzylinderproben ($V = 200 \text{ cm}^3$) (Quelle BFW)

Tab. 4.1 Zusammenstellung der gebräuchlichsten Modellparameter für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Prozessgruppe	Parameter	Prozess	Physikalisch basiert	Konzeptionell	Black Box	Bezug zu Kapitel 3.
Interzeption, Verdunstung, Schnee	Blattflächenindex (<i>LAI</i>)	Interzeption, Blattverdunstung	X			3.3.1. (a)
	Bedeckungsgrad (<i>BG</i>)	Interzeption, Blattverdunstung	X			3.3.1. (a)
	Maximaler Interzeptionsspeicher (<i>Sint-max</i>)	Interzeption, Blattverdunstung		X		3.3.1. (a)
	Stammabflussparameter (<i>Dveg, b</i>)	Stammabfluss		X		3.3.1. (a)
	Crop-Faktor (<i>kc</i>)	Transpiration, Wasseraufnahme durch Pflanzen			X	3.3.1. (b)
	Grenztemperatur(en) Schnee/Regen (<i>ts</i>)	Schneeakkumulation	X			3.3.1. (c)
	Schmelztemperatur (<i>T0,m</i>)	Schmelze	X			3.3.1. (c)
	Schneekorrekturfaktor (<i>SCF</i>)	Messfehler (Unterschätzung) bei festem Niederschlag			X	3.3.1. (c)
	Grad-Tag-Faktor (<i>c0, GTF</i>)	Schmelze		X		3.3.1. (c)
	Albedo (–)	Energiebilanz, Schmelze	X			3.3.1. (c)
Abflussbildung	Bodentiefe, abflussspeichernde Bodenmächtigkeit	Infiltration, Speicherung	X			3.3.2. (a)
	Hydraulische Leitfähigkeit (<i>kf</i>)	Infiltration, Wasserbewegung	X			3.3.2. (a)
	Parameter der Saugspannungskurve und der ungesättigten Hydraulischen Leitfähigkeitskurve (z. B. Van Genuchten: <i>a, n</i>)	Infiltration, Wasserbewegung, Speicherung	X			3.3.2. (a)
	Parameter für die exponentielle Abnahme der Infiltrationsrate nach Horton (<i>k</i>)	Infiltration		X		3.3.2. (b)
	Oberflächenabflussbeiwert	Oberflächenabfluss, Infiltration		X		3.3.2. (b)
	Parameter der Funktion für abflussbeitragende Flächen (z. B. FC, beta)	Abflussbeitrag in Abhängigkeit der aktuellen Bodenfeuchte		X		3.3.2. (b)
	SCS-Kurvennummer (<i>CN</i>)	Direktabfluss		X		3.3.3. (b)
	Abflussbeiwert (ereignisbezogen oder prozentual)	Direktabfluss			X	3.3.2. (c)
Abflusskonzentration	Rauigkeiten (<i>ks, kst</i>)	Routing, Sohlreibung für Schließungsterm in St.-Venant-Gleichungen	X			3.3.3. (a)
	Konzentrationszeit (<i>tc</i>)	Abflussreaktion		X		3.3.3. (b)
	Einheitsganglinien UH	Abflussreaktion			X	3.3.3. (b)
	Speicherkoeffizienten (<i>K</i>)	Abflussreaktion, Auslaufverhalten		X		3.3.3. (b)
	Parameter der Nash Kaskade (<i>n, k</i>)	Routing im Gebiet und Gerinne			X	3.3.3. (b)
	Muskingum-Parameter (<i>K, X</i>)	Routing im Gerinne		X		3.3.3. (b)

4.2. Vorgangsweise bei der Parameterwahl

4.2.1. Zusatzinformation: Hard Data und Soft Data

Die Parameterwahl von Niederschlag-Abfluss-Modellen erfolgt grundsätzlich in mehreren Schritten durch eine Kombination von Parameterkalibrierung am gemessenen Abfluss und durch Verwendung von Zusatzinformationen. Durch die Verwendung von verschiedenartigen, einander ergänzenden Zusatzinformationen – auch qualitativer Natur – können die Parameteridentifikation stark vereinfacht, die Modellstruktur und Parameter plausibilisiert, getroffene Annahmen abgesichert sowie die Ergebnisse interpretiert werden. Der verschiedenartige Informationsgehalt in den einzelnen Quellen wird in einer schrittweisen, inkrementellen und teilweise auch iterativen Vorgangsweise genutzt, sodass ausgehend von *A-priori*-Schätzungen eine Einengung der Bandbreite und Reduktion der Unschärfe durch die in jedem weiteren Schritt zusätzlich Eingang findenden Informationen erfolgt. Im Mittelpunkt stehen das Verstehen der Prozesse und eine Überprüfung der Modellstruktur bzw. der Modellvorstellung.

Zusätzlich erhobene Daten („hard data“) über z. B. Schnee, Bodenfeuchte oder Grundwasserlage können mit den entsprechenden Zustandsgrößen im Modell verglichen werden. Der Schwerpunkt liegt auf der Interpretation des zeitlichen Verlaufs der einzelnen Zustandsgrößen. Ist z. B. der Verlauf des Schneewasseräquivalents plausibel, oder simuliert das Modell Schnee zu lange in den Frühling, und ist der Verlauf der simulierten Abflüsse dazu konsistent? Derartige Information ist allerdings oft nur für einen Punkt im Einzugsgebiet vorhanden. Bei Blockmodellen oder halbverteilten Modellen muss die Information daher je nach Lage des Messpunkts im Gebiet interpretiert und auf die Fläche übertragen werden. Bei flächendetailierten Modellen ist auch ein Pixel-zu-Pixel-Vergleich der Simulation mit der Punktmessung möglich. Außerdem kann bei diesen Modellen der Vergleich von simulierten Schneebedeckungsmustern mit MODIS-Satellitendaten sehr wertvolle Informationen liefern.

Zusatzinformationen qualitativer Natur („soft data“) sind z. B. die Vorstellung über die zu erwartenden Abflussprozesse im Gebiet, meist gewonnen aus Begehungen, Gesprächen mit Ortskundigen oder den vorhandenen Landnutzungs-, Boden- bzw. Hydrotopkarten (vgl. Reszler et al. 2006ab, 2008b). Vor allem beim Fehlen von Abflussdaten ist das Heranziehen von Schätzdaten/Proxydaten, z. B. aus Anschlaglinien rückgerechneter Scheitelwerte, aus Chroniken oder Informationen Ortskundiger (z. B. Laufzeiten, Magnitude, Frequenz von Hochwässern) von großer Bedeutung. Des Weiteren können Einzelmessungen des Abflusses hilfreich sein, beispielsweise bei Wasserbilanzuntersuchungen zur Abschätzung von Niederwasser- bzw. Basisabfluss oder zur Unterscheidung verschiedener Abflussreaktionen im Untergrund (Abflussprofiltypen, z. B. nach Pirkl et al. 2000). Auch Faustformeln für Hochwasserabflüsse und Laufzeiten (Hagen et al. 2007), die jedoch nicht prozessbasiert sind, lassen sich für einen Vergleich heranziehen. Details zur Vorgangsweise einer Plausibilitätsprüfung von Modellen sind in Kapitel 5.2. beschrieben.

Die Verwendung von Zusatzinformationen wird unabhängig vom Modelltyp empfohlen. Modelle mit physikalisch basierten Berechnungsansätzen müssen wegen der Skalenproblematik meist ebenso kalibriert werden wie Modelle mit konzeptionellen Berechnungsansätzen (Kapitel 3.3.). Eine wichtige Quelle für Zusatzinformationen sind bereits vorhandene hydrologische Studien im Einzugsgebiet.

BOX 4.1: Zusatzinformation

Es wird empfohlen, für die Kalibrierung nicht nur Abflussdaten, sondern auch zusätzliche Informationen über das Abflussverhalten im Gebiet heranzuziehen, um Modellparameter und Modellstruktur abzusichern. Die Zusatzinformation kann z. B. aus hydrogeologischen, geomorphologischen und vegetationskundlichen Aufnahmen, Wasserspiegelmarken, Schnee-Verhältnissen und Ausuferungsverhältnissen bestehen. Der Wert lokaler Zusatzinformation ist besonders bei kleinen Gebieten groß. Der Aufwand für die Erhebung und Verwendung der Zusatzinformation ist bei der Planung der Projektkosten zu berücksichtigen. Zusätzlich sind Informationen aus vorhandenen Studien im Gebiet bzw. der Region zu verwenden.

4.2.2. Städtische vs ländliche vs Wildbachgebiete

Bei städtischen Einzugsgebieten wird das Hauptaugenmerk auf den Abfluss von befestigten und teilbefestigten Flächen gelegt sowie der Einfluss des Kanalsystems explizit berücksichtigt. Der Anteil der befestigten Flächen mit rascher Abflussreaktion ist meist für den Abfluss ausschlaggebend. Deswegen ist der Anteil der befestigten Flächen genau zu erheben. Dies kann etwa über Luftbildauswertungen (auch in Kombination mit Infrarotaufnahmen) abgeschätzt werden. Dabei ist es oft schwierig, zwischen befestigten Flächen (z. B. Asphalt und Beton, Dachflächen) und teilbefestigten Flächen (wie zum Beispiel Schotterung, Pflasterungen etc.) zu unterscheiden. Weiters ist es oft schwer bis gar nicht feststellbar, welche der befestigten Flächen tatsächlich in den Kanal entwässern. Zur Klärung der Entwässerungsbedingungen vor Ort sind auf jeden Fall Begehungen notwendig. Der Abflussbeiwert ist ein maßgebender Kalibrierungsparameter. Parameterwerte für Verluste (Anfangsverluste, Muldenverluste etc.) werden aufgrund des verhältnismäßig geringen Einflusses auf das Ergebnis oft direkt aus der Literatur übernommen und nicht kalibriert. Für unbefestigte Flächen kommen oft Ansätze wie das SCS-CN-Verfahren, Horton oder Green-Ampt zur Anwendung und werden auf die tatsächlichen Verhältnisse kalibriert. Tabellierte Werte von Parametern wurden von der ATV (1986 und 1987), Illgen (2009), USDA (1986) und HSGSim (2008) publiziert. Die ÖWAV-Regelblätter 11 und 19 geben Hinweise für die Dimensionierung von Entwässerungsnetzen.

Ländliche Einzugsgebiete sind durch jahreszeitlich unterschiedlich genutzte landwirtschaftliche Flächen und/oder Forstnutzung mit geringen bis mittleren Neigungen gekennzeichnet. Oberflächenabfluss auf Ackerflächen führt häufig zu Erosion.

In Wildbachgebieten ist, im Gegensatz zu ländlichen und städtischen Gebieten, Geschiebe oft ein maßgebender Faktor bei Hochwasser. Abfluss wird i. d. R. gemeinsam mit Geschiebe betrachtet, entsprechend der Prozesseinschätzung nach ONR 24800 in Abfluss ohne Geschiebe, mit Geschiebe, murartiger Abfluss und Murgang. Oft sind wegen der kleinen Gebietsgrößen keine Abflussmessungen vorhanden. Dementsprechend wird mehr Gewicht auf Feldbegehungen und die Identifikation von Überresten historischer Hochwässer gelegt.

BOX 4.2: Städtische vs ländliche vs Wildbachgebiete

In städtischen Einzugsgebieten ist der Anteil befestigter Flächen mit rascher Abflussreaktion meist für den Abfluss ausschlaggebend. Deswegen ist der Anteil der befestigten Flächen genau zu erheben. Eine Kalibrierung der Modellparameter am Abfluss (z. B. im Kanalnetz) wird empfohlen.

In Wildbachgebieten wird der Abfluss häufig in Zusammenhang mit dem Feststofftransport betrachtet.

4.2.3. Kalibrierungshierarchie und Konzept der dominanten Prozesse (DPC)

Zur Ermittlung robuster Modellparameter ist eine schrittweise Vorgangsweise für unterschiedliche Zeitskalen und Raumskalen sinnvoll.

Zeitskalen – Kalibrierungshierarchie: Eine Hierarchie kann bei kontinuierlichen Modellen erstens in zeitlicher Hinsicht erfolgen, z. B. von jährlich zu saisonal bis zum Ereignis. Je nach Zeitskala werden unterschiedliche Parameter kalibriert. Beispielsweise sind auf der jährlichen Skala die Verdunstungsparameter und die Parameter zur Beschreibung des langfristigen Grundwasserspeichers von Bedeutung, auf der saisonalen Skala gewinnen z. B. die Schneeparameter an Bedeutung und auf der Ereignisskala sind wiederum die Parameter der raschen Abflusskomponenten, wie Oberflächenabflussbeiwert, Gerinnerouting, Konzentrationszeit etc. maßgebend, die auf den längeren Zeitskalen keine Rolle spielen. Das heißt, die auf der jeweiligen Zeitskala sensitiven Parameter werden dort kalibriert, aber für die kürzeren und längeren Zeitskalen als fix angenommen.

Raumskalen – Konzept der dominanten Prozesse: Zweitens kann auch in räumlicher Hinsicht unterschieden werden, welche Flächen prioritär behandelt werden. Begonnen wird mit Flächen, auf denen das charakteristische Abflussgeschehen relativ rasch eindeutig abgeschätzt werden kann, z. B. versiegelte Flächen mit größtmöglichem Oberflächenabfluss im Gebiet oder Schutthalden mit hoher lokaler Versickerung und Speicherung. Geeignete Parameter werden manuell gesetzt und vorerst fixiert. Die weitere Kalibrierung erfolgt dann für die Flächen mit schwieriger zu identifizierenden Mischformen der möglichen Abflussprozesse. Diese Vorgangsweise folgt dem Konzept der dominanten Prozesse („Dominant Processes Concept“, DPC, Reszler et al. 2008b), bei dem die hydrologischen Prozesse in einem Gebiet analysiert werden, die sich dem Charakter nach stark unterscheiden. Je nach vorherrschenden hydrologischen Situationen bzw. Typen von Ereignissen werden jeweils unterschiedliche Prozesse dominant und somit unterschiedliche Parameter sensitiv, was die Identifikation der Parameter erleichtert. Zur Identifikation der Prozesse, die auf einer Fläche in einem Gebiet zu erwarten sind, ist eine umfangreiche Gebietskenntnis erforderlich. Aus den zu erwartenden Prozessen kann ein Schluss auf jene Modellteile und Parameter gezogen werden, die für diese Prozesse verantwortlich sind. Die Zuordnung Prozess–Parameter wird durch die Analyse der Sensitivität einzelner Parameter unterstützt (siehe Kapitel 6.1.). Mittels des DPC wurden von Scherrer und Naef (2003) die dominanten Prozesse auf den einzelnen Flächen im Einzugsgebiet über ein Identifikationsschema aus der Oberflächenbeschaffenheit (Topografie, Vegetation etc.) abgeleitet. Peschke et al. (1999) ermittelten experimentell eine ähnliche Prozesshierarchie. In Reszler et al. (2008b) wurde das DPC zur Identifikation von Struktur und Parameter eines flächendetaillierten Abflussmodells zur Hochwasservorhersage angewendet.

Je nach hydrologischer Situation bzw. Ereignistyp können unterschiedliche Parameter in unterschiedlichen Gebietsteilen sensitiv sein. Bei durch Schneeschmelze beeinflussten Ereignissen spielen die Parameter des Schneeschmelzmoduls eine große Rolle. Da sich in vielen Gebieten nach der Schneeschmelze das Abflussgeschehen im gesamten Einzugsgebiet bei nahezu vollständiger Bodensättigung abspielt, können aber auch jene Parameter analysiert werden, die in dieser Situation den größten Einfluss haben (z. B. maximale Speicherfähigkeit des Bodens, Abflussbeitrag bei 100 % Sättigung). Oft zeigt sich auch, dass in diesen Phasen die Prozesse Grundwasserneubildung und -abfluss dominieren, was sich in einer Verschiebung der Abflussreaktion hin zu einem langsameren, gedämpften Auslaufverhalten zeigt. Bei konvektiven Ereignissen trägt oft nur ein geringer Teil des Gebiets zum Abfluss bei (z. B. versiegelte Flächen, steile Flanken mit geringer Bodenüberlagerung). Oft dominieren bei diesem Ereignistyp an der Oberfläche oder oberflächennah ablaufende Abflussprozesse. Speicherfähigere Gebietsteile tragen dann nur zum Basisabfluss bei. Bei advektiven Ereignissen oder bei Doppelereignissen ist durch den anhaltenden Niederschlag zu erwarten, dass zunehmend größere Flächen gesättigt werden und daher zum Direktabfluss beitragen. Jene Parameter, die während der Aufsättigung der Böden das nichtlineare Gebietsverhalten beschreiben (z. B. nichtlinearer Abflussbeiwert, Schwellenwert für Oberflächenabfluss) sind daher hier von besonderer Bedeutung.

Bezogen auf die oben beschriebenen Ereignistypen zeigen folgende Abbildungen beispielhaft Belege für die Annahmen von hydrologischen Abläufen in einem Gebiet in bestimmten Phasen und Situationen. Abb. 4.2 zeigt ausgedehnte ebene Flächen nach der Schneeschmelze. Die Böden sind gesättigt und aufgrund der ebenen Topografie kann das Wasser nicht abfließen. Die gesamte Fläche trägt hier zum (Schmelz-)Abfluss bei, und bei entsprechender Ausdehnung der Flächen in einem Gebiet ist dies ein signifikanter Prozess und bestimmt die Form der Abflussganglinie in dieser Phase. Abb. 4.3 zeigt zwei Beispiele für einen Untergrund mit sehr hoher Speicherkapazität, sandig-grusige Böden als Verwitterungsprodukt von Granit (a), und Schuttflächen mit Bodenauflage und Sumpfvegetation (b), die auf einen großen Wasserspeicher und hohe Verdunstung hinweisen. In beiden Fällen tritt erst nach Auffüllen des Bodenspeichers Oberflächenabfluss auf, und zusätzlich trägt das zerklüftete Gestein zur Speicherkapazität bei. Abb. 4.4 zeigt, dass auch nach längeren Niederschlägen signifikanter Oberflächenabfluss auftreten kann. Dies kann bei entsprechend ausgedehnten Waldflächen, wie sie in vielen österreichischen Flussgebieten vorhanden sind, die zum Direktabfluss beitragende Fläche um ein Vielfaches erhöhen. Bei kurzen, konvektiven Ereignissen tragen diese Flächen jedoch nicht zum Direktabfluss bei, sondern nur die steilen Gräben bzw. versiegelten Flächen ohne Bodenrückhalt.

In räumlicher Hinsicht ist es bei einem großen Einzugsgebiet mit mehreren Pegeln sinnvoll, zuerst die Gebiete im Oberlauf zu kalibrieren, und erst wenn deren Parameter zufriedenstellend sind, sich auf die nächstfolgenden Gebiete bis zum unterliegenden Pegel zu konzentrieren.



Abb. 4.2 Gesättigte Böden nach der Schneeschmelze im Kampgebiet, Niederösterreich



Abb. 4.3 Untergrund mit sehr hoher Speicherkapazität: (a) sandig-grusiger Boden im Kampgebiet, Niederösterreich, (b) Schuttflächen mit Bodenauflage im Semmeringgebiet, Niederösterreich



Abb. 4.4 Auch im Wald kann nach längeren Niederschlägen Oberflächenabfluss auftreten (Kampgebiet, Niederösterreich)

BOX 4.3: Kalibrierungshierarchie und DPC-Konzept

Bei der Kalibrierung wird empfohlen,

- einer Kalibrierungshierarchie von jährlich – saisonal – Ereignisse zu folgen, und
- dem Konzept der dominanten Prozesse zu folgen, bei dem Flächen unterschiedlicher Abflussreaktionen unterschieden werden, um die Identifikation der Parameter zu erleichtern.

4.3. A-priori-Parameter

Am Beginn jeder Kalibrierung – unabhängig ob manuell oder automatisch – steht die Wahl von *A-priori-Parametern*, d. h. Ausgangsparametern für die Kalibrierung. Folgende Möglichkeiten zur Ermittlung von A-priori-Parametern existieren:

- Prozessanalysen aus Feldbegehungen in Teilen des Einzugsgebietes und Gespräche mit Ortskundigen,
- Analysen von beobachteten Abflussganglinien und/oder Grundwasserganglinien,
- Analyse von Gebieteigenschaften sowie digitalen Karten des Geländes, Landnutzung, Böden, Geologie und
- Literaturangaben.

Ohne Messdaten ist eine Kalibrierung definitionsgemäß nicht möglich. Daher kommt bei Fehlen von Abflussdaten der Wahl von A-priori-Parametern besondere Bedeutung zu.

4.3.1. Prozessanalyse und Prozessverständnis – Begehungen

Das wichtigste Mittel zur hydrologischen Charakterisierung des Einzugsgebietes stellen Felderhebungen und Kartierungen im Rahmen von Begehungen oder Befahrungen dar. Die Felderhebungen dienen vor allem zur Definition von Hydrotopen (hydrologisch ähnlichen Einheiten) und zur Einschätzung der dominanten Prozesse in einem Gebiet (Pirkl und Sausgruber 2015; DWA 2019).

Zur Durchführung der Begehungen und daraus gewonnene Parameter existieren in der Literatur einige Anleitungen, wie zum Beispiel die Geländeanleitung von Markart et al. (2004 und 2006) zur Einschätzung des Oberflächenabflusses sowie Arbeiten von Rickli und Forster (1997), Naef et al. (1998), Löhmannsröben et al. (2000) oder Scherrer et al. (2002). Diese Anleitungen geben auf Basis von z. B. Morphologie, Gerinnenetz, Vegetation, Böden, Gerinne- und Oberflächenrauheit Hinweise über die in einem Gebiet oder auf Teilflächen zu erwartenden Prozesse. Hinsichtlich Hochwasserentstehung kann beispielsweise konkret auf vernässte Flächen, Spuren von Oberflächenabfluss nach Ereignissen, bei Hanganschnitten auf Hangwasseraustritte oder Ausuferungsmarken mittels sog. Post-event-Surveys (Borga et al. 2011) geachtet werden. Oft sind Gespräche mit Ortskundigen hilfreich, um Abläufe während eines Hochwasserereignisses zu rekonstruieren. Vorhandene Studien im Gebiet sollten für Vergleichszwecke berücksichtigt werden (z. B. Ereignisdokumentation).

Die folgenden Abbildungen zeigen Beispiele von signifikanten Eigenschaften im Gelände, die auf die maßgebenden Abflussprozesse und somit auf die Größenordnung der entsprechenden Parameter auf diesen Flächen hinweisen.

Abb. 4.5a zeigt Feuchtflecken mit entsprechender Vegetation am Hangfuß, was auf signifikanten Interflow bzw. Exfiltration von Grundwasser im Tal hindeutet. D. h., der Anteil an Grundwasser in dem Gebiet (Hang) ist groß. Zusätzlich sind Rinnen zu sehen, in denen sich oberflächliches Wasser sammelt und abfließt. Diese haben aber ein begrenztes Einzugsgebiet und sind daher nicht sehr ausgeprägt. Für die Parameterwahl ergibt sich für einen derartigen Hang, dass die Parameter so gewählt werden, dass sich eine hohe Infiltration, wenig Oberflächenabfluss, ein hoher Anteil an Interflow und ein hoher Anteil an Perkolation in die Grundwasserspeicher ergibt. Die Parameter zur Beschreibung des Oberflächenabflusses besitzen hier keine große Bedeutung. Im Gegensatz zum ersten Beispiel zeigt Abb. 4.5b stark ausgeprägte oberflächliche und oberflächennahe Fließwege. An den deutlich erkennbaren Rinnen und Rinnenstrukturen sammelt sich im Ereignisfall oberflächliches Wasser und fließt ab. D. h., der rasch reagierende Oberflächenabfluss dominiert auf dieser Fläche. Für die Parameterwahl heißt das, dass große Oberflächenabflussbeiwerte oder – bei Modellen mit Bodenspeicher – geringe Durchlässigkeiten der oberen Bodenschicht gewählt werden bzw. die Bodentiefen entsprechend niedrig angesetzt werden, wenn eine seichte stauende Schicht existiert. Die Bodentiefen und die geologischen Verhältnisse werden in den Begehungen abgeschätzt.

Das dritte Beispiel in Abb. 4.6 zeigt einen steilen Hang mit einem Untergrund bestehend aus Schiefer mit hangparalleler Schichtung. An diesem Hang ist kein Versickern in den Untergrund zu erwarten. Auch die Bodenaufgabe ist gering, d. h., es ist mit einem sehr hohen Anteil an Oberflächenabfluss und einer sehr raschen Abflussreaktion zu rechnen. In diesem Fall sind die Durchlässigkeiten und Speicherfähigkeit der oberen Bodenschicht von geringer Bedeutung. Wichtig ist, dass in der Parameterwahl den stark stauenden Eigenschaften des Schieferuntergrundes Rechnung getragen wird. Die Perkolation in tiefere Schichten kann vernachlässigt werden.

Das nächste Beispiel in Abb. 4.7a zeigt die Entstehung von Oberflächenabfluss auf einer leicht geneigten, brach liegenden landwirtschaftlich genutzten Fläche. Struktur und Parameter im Modell müssen die Entstehung von Oberflächenabfluss in Abhängigkeit von Hangneigung, Zustand der Vegetation, Regenintensität, Bodensättigung usw. abbilden können. In Abb. 4.7b sind Sättigungs- und Ausuferungsflächen im Bereich eines mäandrierenden Flusses zu sehen. Das Gebiet ist ständig gesättigt, sodass der Niederschlag, nach Überbrücken eines geringen Muldenrückhalts, unmittelbar zum Abfluss beiträgt. Außerdem ist die Verdunstung aufgrund des ständig für die Vegetation verfügbaren Wassers lokal hoch. Ständig gesättigte Verhältnisse werden z. B. über die Wahl einer geringen Speicherkapazität der Böden oder einer geringen Tiefe der ungesättigten Zone modelliert. Muldenrückhalt und Überflutungscharakter können zu einer leicht verzögerten Abflussreaktion führen.

Das Beispiel in Abb. 4.8 zeigt die Auswirkungen einer Verschlammung auf einem schwach geneigten Feld, wodurch die – üblicherweise auf derartigen Böden relativ hohe – Infiltration

be- bzw. verhindert wird und Oberflächenabfluss entsteht. Die Spuren der Verschlammung sind im Bild rechts zu sehen. Bei einer Modellierung der Abflussverhältnisse auf dieser lokalen Skale wird die Verschlammung berücksichtigt, indem lokal die Durchlässigkeiten, vor allem bei höheren Intensitäten, herab gesetzt bzw. die Abflussbeiwerte erhöht werden. Auf größerer Skale (Gebietsskale) hängt es vom Anteil derartiger Flächen im Gebiet ab, ob sie Berücksichtigung finden.



Abb. 4.5 a) Feuchtflächen mit entsprechender Vegetation am Hangfuß deuten auf signifikanten Interflow hin (Semmering, Steiermark), b) Stark ausgeprägte Rinnen und Rinnenstrukturen zeigen, dass rasch reagierender Oberflächenabfluss dominiert (Einzugsgebiet des Spullersee, Vorarlberg)



Abb. 4.6 Schiefer und hangparallele Schichtung im steilen Gelände lassen kein Versickern in den Untergrund und sehr rasche Abflussreaktion erwarten (Karawanken, Kärnten)



Abb. 4.7 (a) Oberflächenabfluss am Hang muss auch durch das Modell nachgebildet werden können (Kirchheim, Oberösterreich), (b) Sättigungsflächen im Bereich eines mäandrierenden Flusses tragen nach Überbrücken eines geringen Muldenrückhalts unmittelbar zum Abfluss bei (Kamp bei Rappottenstein, Niederösterreich)



Abb. 4.8 (a) Stehendes und oberflächlich abfließendes Wasser durch eine verminderte Infiltration auf einem verschlammten Feld und (b) Spuren der Verschlämzung (bei Herzogbirbaum, Niederösterreich)

BOX 4.4: Prozessanalyse Begehungen

Für die Abflussmodellierung in kleinen Einzugsgebieten wird eine Feldbegehung empfohlen. Dabei sind Flächen unterschiedlicher Abflusswirksamkeit und Reaktionen in Hinblick auf Oberflächenabfluss, Sättigungsflächen, Infiltrationseigenschaften, Hydrogeologie, Retentionsflächen und anthropogene Eingriffe (z. B. Straßen) zu erheben und zu dokumentieren. Damit soll eine Einschätzung der dominanten Prozesse und damit eine A-priori-Abschätzung der Parameter erfolgen. Dem Prozessverständnis aus Feldbegehungen kommt beim Fehlen von Abflussdaten besondere Bedeutung zu.

Bei größeren Einzugsgebieten gewinnen andere Informationen (Kalibrierung am Abfluss, auch in vergleichbaren Einzugsgebieten, Karten von Vegetation, Boden und Geologie) an Bedeutung. Gezielte Feldbegehungen sind zusätzlich sinnvoll, um die Plausibilität der Parameter zu überprüfen.

4.3.2. Prozessanalyse anhand Abflussdaten und Grundwasserganglinien

Aus einer Analyse der Dynamik von Abflussganglinien und Grundwasserganglinien können A-priori-Parameter gewonnen werden, die das Auslaufverhalten bzw. Speicherverhalten eines Gebiets charakterisieren. Speicherkoeffizienten für den Oberflächen- und Basisabflussanteil können direkt anhand der Anpassung einer Exponentialfunktion im Bereich des Rückgangs der Abflussganglinie geschätzt werden, wenn kein Niederschlag fällt. Der Koeffizient des expo-

nentiellen Rückgangs dient in vielen Fällen direkt als Modellparameter (Speicherkoeffizient). Oft zeigt sich auch, dass je nach den hydrologischen Bedingungen unterschiedliche Auslauf-eigenschaften auftreten, was wiederum Schlüsse auf Unterschiede in den jeweils ablaufenden Prozessen erlaubt. Beispielsweise zeigen kurze kleinräumige Gewitter im Sommer oft einen raschen Rückgang der Abflussganglinie, was auf einen hohen Anteil an Oberflächenabfluss schließen lässt. Hingegen zeigt sich nach der Schneeschmelze oder nach lang andauernden Ereignissen oft ein langsamer Auslauf, was auf einen hohen Anteil an unterirdischem Abfluss hindeutet.

Ebenso können Grundwasserganglinien und Quellschüttungen analysiert werden. Die daraus gewonnenen Parameter beziehen sich auf die länger im Gebiet gespeicherten Abflussanteile. Dies ist vor allem bei Wasserbilanzuntersuchungen auf einer längeren Zeitskala von Bedeutung, lässt aber auch Rückschlüsse – in Kombination mit hydrogeologischen Daten und Bo-dendaten – über generelle Abflussbereitschaft und Speichereigenschaften in einem Gebiet zu.

Wenn Hochwässer von Interesse sind, ist es sinnvoll, Ereignisabflussbeiwerte auszuwerten. Dabei wird für einzelne Abflussereignisse der Basisabfluss mittels grafischer Methoden oder digitaler Filter abgetrennt (Merz et al. 2006), und der Abflussbeiwert als Verhältnis von Di-rektabflussvolumen und Ereignisniederschlag dargestellt. Abb. 4.9 zeigt eine derartige Auswertung, bei der Ereignisabflusshöhen gegen die Niederschlagshöhen aufgetragen sind. Der Abflussbeiwert, definiert als Verhältnis von Ereignisabflussvolumen und zugehörigem Nieder-schlagsvolumen, wäre dann konstant, wenn die Beziehungen in Abb. 4.9 einer Geraden durch den Ursprung folgten. Die Beziehungen sind jedoch gekrümmt (werden steiler mit zunehmen-dem Niederschlag). Das bedeutet, dass auch die Abflussbeiwerte zunehmen. Das sind Infor-mationen, die für die Modellierung von Extremereignissen sehr wichtig sind. Entsprechende Auswertungen sollten vor einer Kalibrierung der Modelle durchgeführt werden. Eine zusätzli-che sinnvolle Auswertung ist die Analyse von Ereignistypen (konvektive Ereignisse, Schnee-schmelzereignisse, siehe Merz 2002).

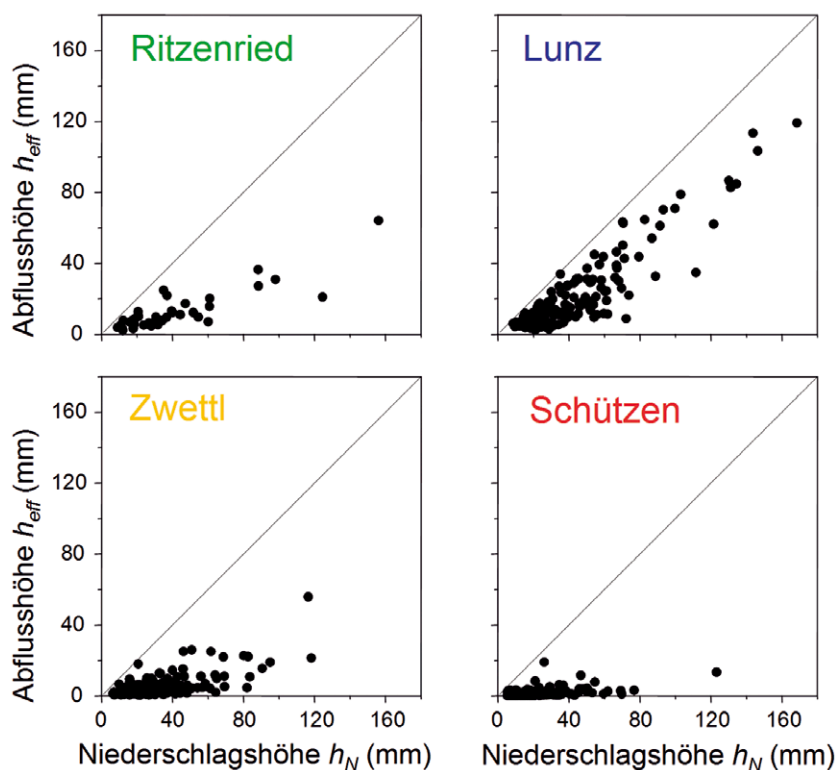


Abb. 4.9 Gegenüberstellung von Ereignisabflusshöhe h_{eff} (Direktabflussvolumen bezogen auf die Gebiets-fläche) und Niederschlag h_N aus Auswertungen von Abfluss- und Niederschlagsdaten für vier Gebiete. Die Abflussbeiwerte (Verhältnis von h_{eff} und h_N) sind im Gebiet Lunz am größten und Schützen am kleinsten. Sie nehmen für ein Gebiet mit der Ereignisgröße zu (Merz et al. 2006)

BOX 4.5: Prozessanalyse - Abflussdaten

Es wird empfohlen, eine Voranalyse von Abflussdaten im Vergleich zu Niederschlagsdaten durchzuführen, die Aufschlüsse über Parameter (z. B. Speicherkoeffizienten, Abflussbeiwerte) gibt. Auch eine Analyse von Grundwasserständen (Porengrundwasserkörper) und Quellschüttungen (Kluftgrundwasserkörper), die Hinweise auf die interne Dynamik des Gebietes geben, kann sinnvoll sein.

4.3.3. Parameter aus Gebietseigenschaften

Gebietseigenschaften (Kapitel 2.4.) können bei der Parameterbestimmung im Wesentlichen für vier Gruppen von Aussagen herangezogen werden (Blöschl 2005):

- Geometrie des Gebietes und des Gerinnenetzes,
- Teilgebiete, die in Hinblick auf bestimmte Parameter als homogen angesehen werden (Hydrotope siehe Kapitel 3.2.2.),
- Vorabwerte für zu kalibrierende Parameter (A-priori-Parameter) und
- Werte für Parameter, die keinen großen Einfluss auf den Abfluss besitzen (je nach Fragestellung).

Topographie: Digitale Geländemodelle, Gebietsgrenzen und Gewässernetz dienen zur geometrischen Definition des Gebietes. Daraus lassen sich Fließlängen ableiten. Unter Verwendung empirischer Gleichungen (Izzard 1946; FAA 1970; Morgali and Linsley 1965) werden mitunter Laufzeiten bestimmt, die aber für österreichische Verhältnisse in der Regel nicht passend sind.

Vegetationsparameter: Diese können aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden (Gorte 2000; Kite and Droogers 2000). In Abb. 4.10 wurde beispielsweise der Blattflächenindex (LAI) aus der spektralen Signatur von Satellitenbildern unter Verwendung des NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) bestimmt.

Oberflächenrauigkeiten: Zahlreiche Tabellen liegen in der Literatur vor, die Rauigkeiten (meistens nach Manning-Strickler) mit den Oberflächeneigenschaften in Beziehung setzen (z. B. Hessel et al. 2003; Engman 1986). Auch Markart et al. (2004) geben Rauigkeitsbeiwerte für verschiedene Reaktionseinheiten an. Diese können als A-priori-Parameter verwendet werden.

Bodenkenngrößen: Für praktische Anwendungen stehen in den seltensten Fällen Messungen von Bodenparametern (z. B. hydraulische Leitfähigkeit k_f) zur Verfügung, und diese wären wegen des Skalenproblems auch kaum repräsentativ. Es besteht aber die Möglichkeit, die Bodenparameter aus breitenverfügbaren Bodeninformationen wie Bodenart (Kornverteilung), Humusanteil, Grobanteil und Lagerungsdichte, z. B. unter Nutzung der digitalen Bodenkarte Österreichs (eBod, siehe Kapitel 2.4.2.) abzuleiten. Das kann mit sogenannten Pedotransferfunktionen erfolgen (z. B. AD-HOC-Arbeitsgruppe Boden 2005; ROSETTA – Schaap et al. 2001). Abb. 4.11 zeigt eine für die Anwendung der Richards-Gleichung erforderliche gemessene Saugspannungskurve. In ähnlicher Weise wurden Tabellenwerte etwa für die Green-Ampt-Parameter publiziert (Rawls et al. 1983). Wie in Wösten et al. (2001) dargestellt und in Parajka et al. (2013, Seite 247) diskutiert, benötigen derartige Pedotransferfunktionen aber in der Regel eine lokale Kalibrierung, um zuverlässige Werte zu liefern. Sie sind aber sinnvolle Informationen, um Ähnlichkeiten der betrachteten Böden mit Böden in der Umgebung abzuleiten. In diesem Zuge ist eine genaue Kartierung mithilfe von Feldbegehungen notwendig. Für manche Regionen Österreichs wurden bereits detaillierte Auswertungen der hydrologischen Bodenkenngößen vorgenommen. Für Niederösterreich steht eine Datenbank zur Verfügung (HydroBodNÖ; Eder et al. 2011; siehe Kapitel 2.4.2.). HydroBodNÖ erfasst in einem 50-x-50-m-Raster auf GIS-Basis die gesamte Landesfläche von Niederösterreich. Die Böden sind bis zu einer Tiefe von 100 cm analysiert. Bewertet wurden hydrologisch-geologische Substratgruppen, abflussspeichernde Bodenmächtigkeit, vertikale Wasserleitfähigkeit der ober-

ten Bodenschicht und als harmonisches Mittel aller Bodenschichten, Gesamtporenvolumen über die Tiefe, nutzbare Feldkapazität für die oberste Tiefenschicht und als gewichteter Mittelwert über das gesamte Tiefenprofil, sowie eine Klassifizierung der Bodenelemente nach dominanten Abflussprozessen. In einem Nachfolgeprojekt soll nunmehr die Abschätzung eines volumetrischen Abflussbeiwertes in Abhängigkeit von Niederschlagsintensität und -dauer ebenfalls auf GRID-Basis ermöglicht werden. Aus derartigen Informationen lassen sich direkt Modellparameter bestimmen. Zusätzlich können mithilfe von Daten und Studien an den in Österreich betriebenen Lysimetern Anhaltspunkte für die Parameterwahl, speziell für Wasserhaushaltsberechnungen zur aktuellen, vegetationsbezogenen Verdunstung und Wasserbewegung in der ungesättigten Zone gewonnen werden (z. B. Schelle et al. 2012; Klammner et al. 2014; Eder et al. 2015; Reszler und Fank 2016).

Für alpine Flächen steht eine Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes und eine zugehörige Datenbank zur Verfügung (Markart et al. 2004; siehe Kapitel 2.4.4.). Damit können im Feld auf Basis von Vegetations- und Bodenmerkmalen sowie Eigenschaften der Landnutzung normierte Oberflächenabflussbeiwerte für verschiedene hydrologische Reaktionseinheiten als A-priori-Parameter für die Kalibrierung und Modellierung abgeleitet werden. Weitere Ableitungen aus der Berechnungsdatenbank erlauben eine prozessnahe Modellierung der zeitlichen Abflussbeiwertentwicklung über die spezifischen Anfangsverluste (Initialabstraktion) und die Intensitätsabhängigkeit des Abflussbeiwertes (siehe Kapitel 3.3.2.). Für die Verwendung des SCS-CN-Verfahrens zeigten Merz et al. (2006), dass die Kurvennummern nicht aus den Gebietseigenschaften nach dem Standardverfahren, sondern aus beobachteten Abflussdaten rückgerechnet werden sollten.

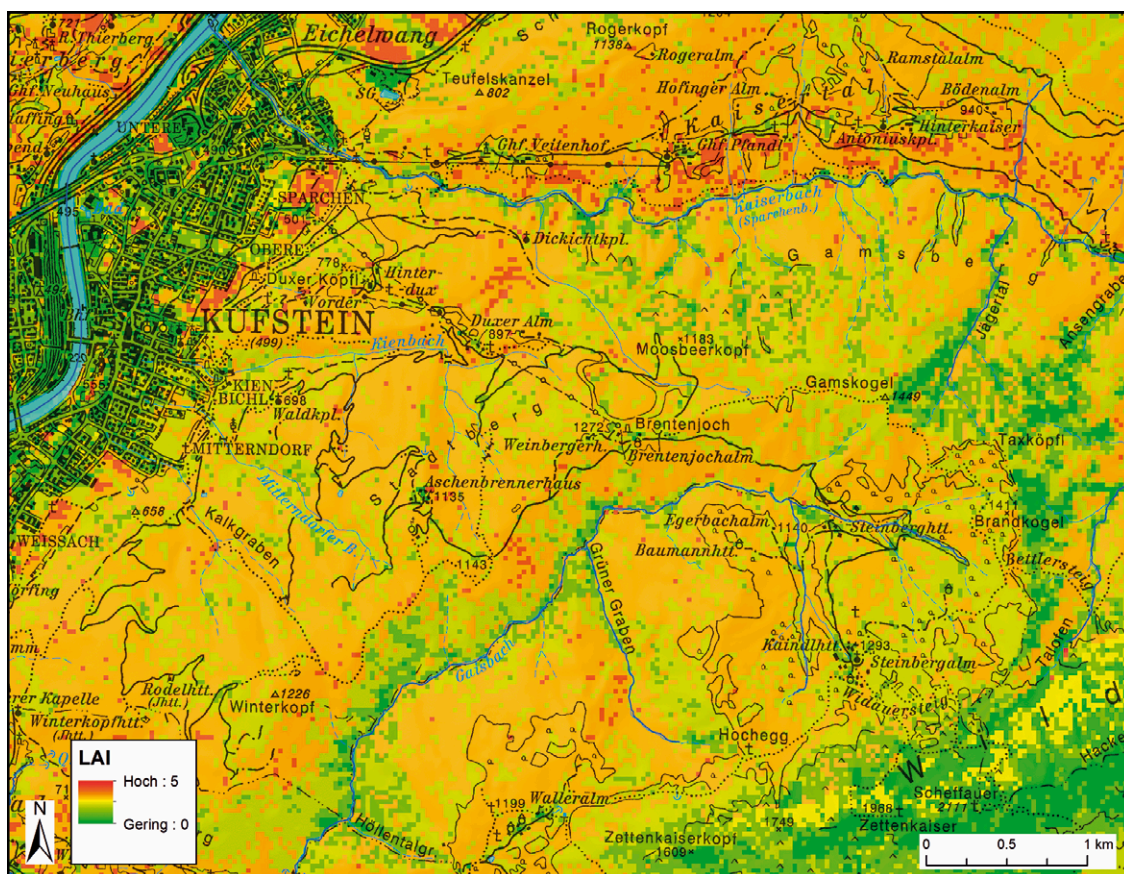


Abb. 4.10 Blattflächenindex (LAI), abgeleitet aus Satellitenbildern und stichprobenartige Verifizierung anhand von Bodenmessungen

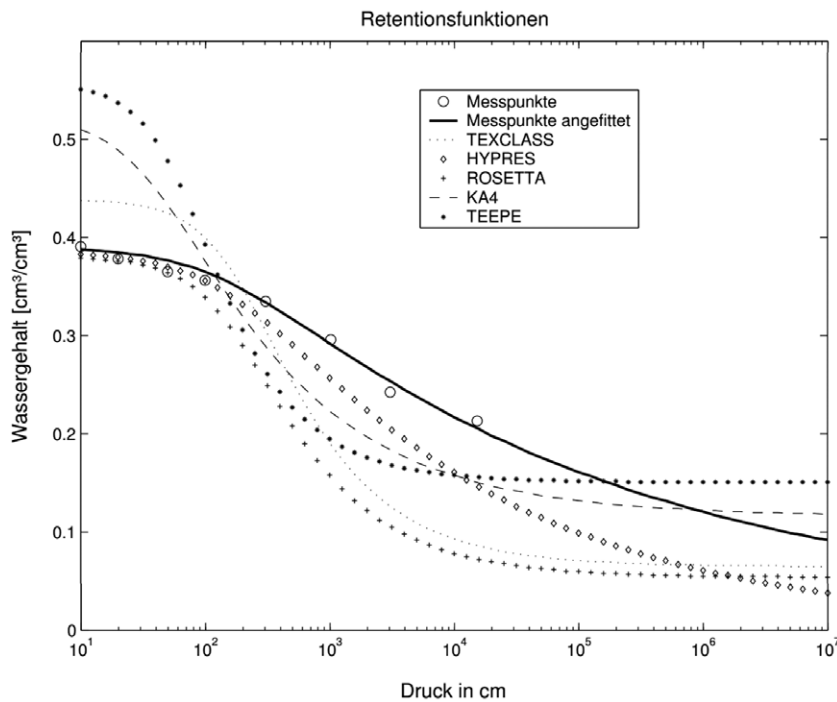


Abb. 4.11 Vergleich zwischen gemessener Saugspannungskurve und berechneten Saugspannungskurven aus Pedotransferfunktionen (aus Morgenstern 2007)

Geologische Kenngrößen: Aus geologischen Karten können Eindrücke über die generelle Abflussbereitschaft, Speicherfähigkeit, tiefgründige Versickerung oder Karst gewonnen werden. Daraus ergeben sich Hinweise über die Größenordnung von Modellparametern, insbesondere für die langsamen Abflusskomponenten. Regional wird vermehrt an hydrogeologischen Informationen zu untergrundabhängigen Abflussprozessen gearbeitet (z. B. Pirkl 2012; Pirkl und Sausgruber 2015; Markart et al. 2013). Dabei werden hochauflösende digitale Geländemodelle, Orthofotos und geologische Karten räumlich interpretiert und z. B. nach potenziellem Oberflächenabfluss, seichtgründigem Zwischenabfluss, tiefgründigem Zwischenabfluss und tiefgründigem Grundwasserabfluss klassifiziert („Abflussprofiltypen“). Je nach Arbeitsmaßstab (regionale Übersicht oder gezielte Einzugsgebietsstudie) erfolgt eine Plausibilisierung und Geländekontrolle mit unterschiedlicher Intensität sowie gezielten Durchflussmessungen an Kontrollpunkten. Rogger et al. (2012a, b) entwickelten eine Methode, um aus diesen qualitativen Informationen konkrete Modellparameter als A-priori-Werte abzuleiten. Die geologische Einschätzung des Abflusses im Gebiet und die daraus resultierenden Abflussprofiltypen geben Aufschluss über die potenzielle Speicherfähigkeit des Einzugsgebietes, d. h., auf welchen Flächen des Gebietes der Abfluss z. B. vorwiegend im tiefen Grundwasser und somit stark zeitlich verzögert stattfindet oder auf welchen Flächen es beispielsweise zu einem schnellen Abfluss direkt an der Oberfläche kommt (siehe Abb. 4.12). Für die Wahl der Parameter eines Modells sind derartige Informationen hilfreich, da sie zeigen, wo große Speicher im Modell anzusetzen sind bzw. auf welchen Flächen nur eine geringe bis gar keine Speicherfähigkeit vorhanden ist. Die Parameter, die den Grundwasserabfluss beschreiben, müssen so gewählt werden, dass sie diese räumliche Variabilität wiedergeben, d. h. in Bereichen mit tiefgründigem Abfluss sind beispielsweise große Speicherkonstanten anzusetzen. Die Verzögerung des Abflusses auf Flächen mit tiefgründigem Grundwasserabfluss liegt dabei im Bereich von Tagen bis Wochen, mit tiefgründigem Zwischenabfluss im Bereich von Stunden bis Tagen und bei seichtgründigem Zwischenabfluss im Bereich von Stunden. Oft tritt in gebirgigen Gebieten je nach vorherrschender Geologie zusätzlich ein großer, sehr langsam entwässernder Grundwasserspeicher auf (Verzögerungszeiten mehrere Monate), der zu einem relativ hohen Basisabfluss führt. Die Einbindung von Geologen oder Hydrogeologen kann je nach Bedeutung der im Untergrund ablaufenden Prozesse und entsprechender Fragestellung (z. B. Wasserbilanz) sinnvoll sein. Sind die Flächen rein durch Oberflächenabfluss charakterisiert, müssen die Parameter im Modell so gewählt werden, dass es zu keinem Grundwasserabfluss kommt. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass die tatsächliche Speicherfähigkeit einer Fläche nicht

rein von den geologischen Gegebenheiten, sondern auch von den Bodeneigenschaften und der Landnutzung abhängt. Diese Informationen müssen bei der Wahl der Parameter, die den Oberflächenabfluss bestimmen, einfließen. Derartige qualitative geologische Informationen können auch bei der automatischen Kalibrierung von Modellen hilfreich sein, indem sie dazu verwendet werden, Grenzen für die Parameter anzusetzen, z. B. dass Speicherparameter auf Flächen mit tiefgründigem Abfluss immer größer sind als jene auf Flächen mit seichtgründigem Abfluss (Hrachowitz et al. 2014).

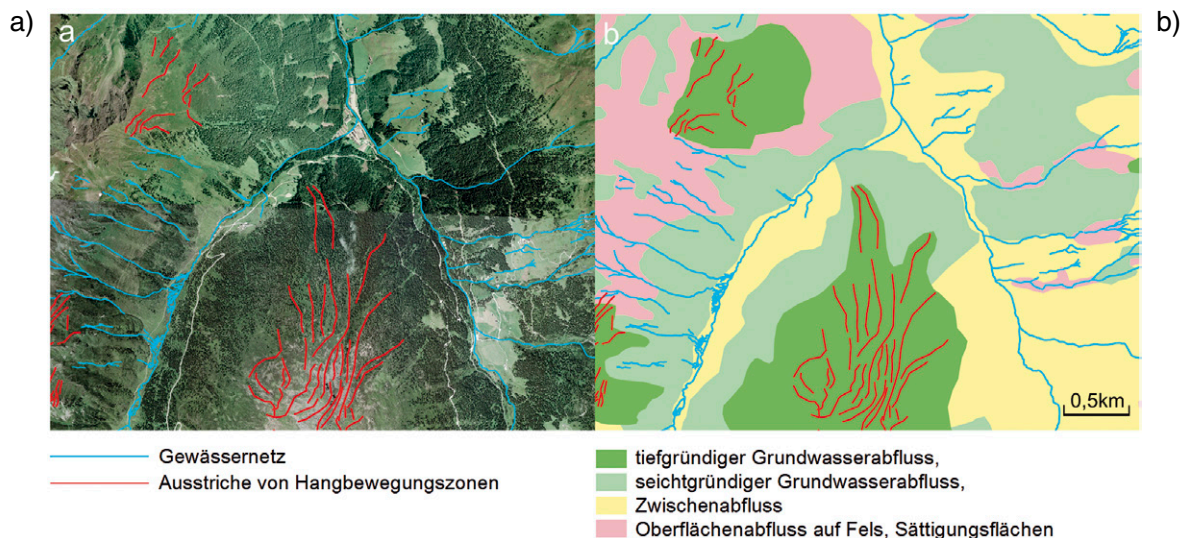


Abb. 4.12 Ausschnitt aus dem Wattenbachgebiet, Tirol: (a) Orthofoto mit der Auswertung geomorphologischer Phänomene, (b) Ausschnitt aus der Karte der untergrundabhängigen Abflussprozesse, die aus Feldbegehungen unter Verwendung geologischer und morphologischer Informationen bestimmt wurde (Rogger et al. 2012a)

BOX 4.6: Parameter aus Gebietseigenschaften

Bodenkarten und andere flächendeckend verfügbare Informationen können zur Bestimmung von Teilflächen mit ähnlichen hydrologischen Eigenschaften (Hydrotopen) herangezogen werden.

Eine Vorabschätzung von Parametern der Bodeneigenschaften kann auf Basis von Bodenkarten in Verbindung mit Pedotransferfunktionen erfolgen. Allerdings sind solche Transferfunktionen wegen des Einflusses von Makroporen oft nicht auf Einzugsgebietsebene repräsentativ. Die Kalibrierung der Parameter am Abfluss und ergänzende Geländebegehungen werden deshalb empfohlen. Auch die Kurvennummern des SCS-CN-Verfahrens sollten aus beobachteten Abflussdaten rückgerechnet werden.

In ähnlicher Weise können Parameter der langsamen Komponenten des Abflussmodells auf Basis hydrogeologischer Informationen, am besten aus Geländebegehungen, vorab geschätzt werden.

4.4. Parameterkalibrierung am Abfluss

4.4.1. Vorgangsweise

Das Ziel der Kalibrierung besteht darin, die Modellparameterwerte so zu ändern, dass die simulierte Abflussganglinie möglichst ähnlich der gemessenen Abflussganglinie ist.

Die Kalibrierung kann entweder manuell oder automatisch erfolgen. Eine manuelle Kalibrierung ist aufwendiger, aber es ist leichter möglich, Zusatzinformationen über das Prozessverständnis in den Vorgang einzubringen. Bei manueller Kalibrierung ist die Dokumentation der Veränderung der einzelnen A-priori-Parameter hilfreich, um bei einem eingeschlagenen „Irr-

weg“ der Kalibrierung wieder zurück zu einem für die weitere Kalibrierung brauchbaren Ausgangszustand zu finden. Die resultierende Modellqualität hängt stärker von der Erfahrung des Modellierers ab. Als Startwerte für die Kalibrierung dienen A-priori-Parameter, die nach Kapitel 4.3. ermittelt werden können. Diese werden bei der Kalibrierung im Rahmen der jeweiligen Unsicherheit variiert, bis eine bestmögliche Deckung der simulierten und der beobachteten Abflussganglinie erzielt wird. Zur Bewertung der Güte der Simulation dienen Zielfunktionen und eine visuelle Beurteilung (siehe Kapitel 4.4.2.).

Die Kalibrierung sollte anhand möglichst umfangreicher Abflussdaten erfolgen, die unterschiedliche hydrologische Situationen abdecken. Für Ereignismodelle sollten mindestens ein großes Ereignis und mehrere kleine Ereignisse enthalten sein, womöglich unterschiedlicher Art (Dauer, Schnee/kein Schnee). Für kontinuierliche Modelle sollten Abflussdaten mehrerer Jahre für die Kalibrierung verwendet werden. In jedem Fall ist es essenziell, einen Teil des Datensatzes nicht für die Kalibrierung zu verwenden, sondern für die Validierung des Modells aufzuheben (Split-Sample-Test, siehe Kapitel 5.1.). Modellunsicherheiten und Datenfehler können zu Schwierigkeiten in der Kalibrierung führen. Eine eingehende Analyse der verwendeten Daten ist notwendig (Fehler bzw. Konsistenz in den Eingangsdaten, siehe Kapitel 2.2., 2.3.1. und 6.1.). Modell- bzw. Parameterunsicherheiten werden durch Sensitivitätsstudien ermittelt (siehe Kapitel 6.1.).

Oft muss eine Einschätzung der Extrapolierbarkeit des Modells auf Ereignisse oder Situationen erfolgen, die nicht im Datensatz vorhanden sind. Dabei wird das Augenmerk auf das Verhalten bei Extremereignissen gelegt. Abb. 4.13 zeigt ein Beispiel für eine Kalibrierung an ein kleines und an ein extremes Hochwasser. Aufgrund der Nichtlinearität des Abflussgeschehens tritt beim dargestellten Extremereignis ein gegenüber der beobachteten Niederschlagssumme überproportional hoher Abflussscheitel auf. Er beträgt ungefähr das Vierfache des Scheitels des kleinen Hochwasserereignisses. Sind derartige Ereignisse nicht im Datensatz vorhanden, sollte dennoch anhand von Szenarienrechnungen das Extrapolationsverhalten des Modells getestet und mit vorhandenen Dokumentationen von großen Hochwässern verglichen werden.

Wie bei der Modellwahl ist auch bei der Kalibrierung die Zielstellung der Modellrechnung zu berücksichtigen (Langzeitverhalten, Ereignisse – Hochwasser, Niederwasser). Auf Basis der Aufgabenstellung werden auch die Vergleichsdaten für die Kalibrierung bzw. die notwendigen Kalibrierungszeiträume und die Zielfunktion gewählt. Dies hängt auch mit der generellen Verfügbarkeit verschiedener Datensätze, wie z. B. kontinuierlicher, einzugsgebietsbezogener Datensätze, genügend vieler Einzelereignisse oder historischer Zeitreihen zusammen. Beispielsweise werden bei der Kanalbemessung zur Kalibrierung drei relevante, voneinander unabhängige Ereignisse oder eine mindestens einjährige Jahresreihe gefordert (ÖWAV-Regelblatt 19, ÖWAV 2007b). Zur Ermittlung des Bemessungshochwassers und für viele Bewirtschaftungsfragen sind längere Reihen notwendig.

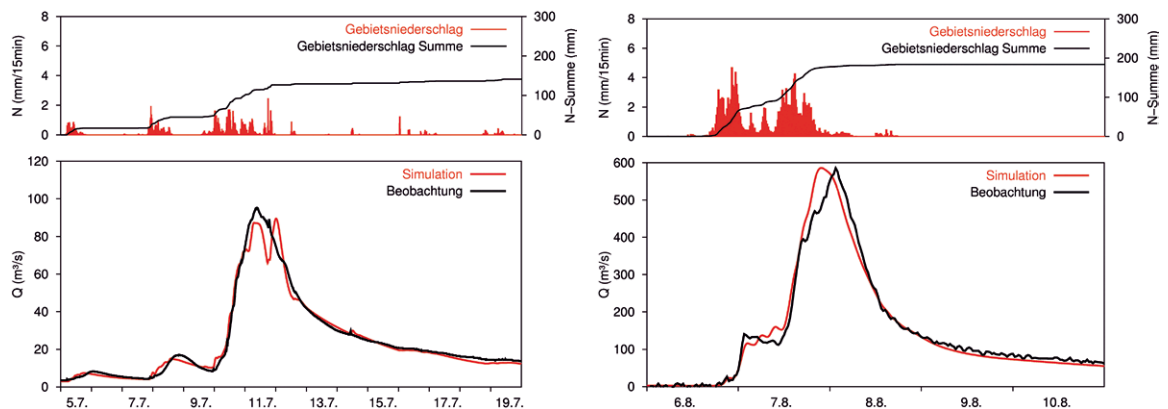


Abb. 4.13 Kalibrierung an einem kleinen Hochwasser (links, Juli 2005, Pegel Zwettl/Kamp, Fläche 622 km²) und an einem Extremereignis (rechts, August 2002, Zulauf zum Speicher Ottenstein, Fläche 889 km²) (Reszler et al. 2006a)

Die Kalibrierung dient auch zum Ausgleich systematischer Fehler in den Eingangsdaten. Sind die Eingangsdaten der Lufttemperatur beispielsweise zu hoch, ergibt sich bei der Kalibrierung eine höhere Grenztemperatur für den Übergang Regen/Schnee. Sind die Eingangsdaten des Niederschlags zu gering, ergibt sich ein größerer Abflussbeiwert, um den gemessenen Abfluss zu erhalten. An sich ist das ein gewünschter Effekt, da dadurch die Genauigkeit der Modelle (im Vergleich zur Situation ohne Kalibrierung) erhöht wird, denn die systematischen Fehler der Eingangsdaten sind i. d. R. nicht bekannt. Allerdings können bei groben systematischen Fehlern die Parameter nach der Kalibrierung ihre Übertragbarkeit auf andere Situationen bzw. Ereignisse verlieren. Es ist deswegen darauf Bedacht zu nehmen, dass die Eingangsdaten für die Kalibrierung und die Anwendung ähnliche Eigenschaften betreffend systematischer Fehler aufweisen. Für die Kalibrierung und die Anwendung sollte daher dieselbe Datengrundlage verwendet werden sowie dieselbe Methodik bei der Regionalisierung (z. B. zur Berechnung des Gebietsniederschlags aus den Punktniederschlägen). Ändert sich die Datensituation (z. B. zusätzliche Niederschlagsstationen) und/oder die Regionalisierungsmethodik wesentlich gegenüber der Kalibrierung, sollten mögliche Änderungen des systematischen Fehlers durch Vergleich mit längeren Reihen in Nachbargebieten überprüft werden (siehe Kapitel 2.2.). Werden relevante Änderungen festgestellt, ist eine Neukalibrierung der Modellparameter erforderlich. Dies gilt insbesondere auch für Echtzeitmodelle der Abflussvorhersage, wenn sich die Methodik der Regionalisierung des Niederschlags ändert.

BOX 4.7: Vorgangswise Kalibrierung

Es wird empfohlen, bei der Kalibrierung hydrologisch basierte A-priori-Parameter als Startwerte zu wählen und diese im Rahmen plausibler Grenzen zu variieren. Die gemessenen Abflüsse sollten durch das Modell mit guter Näherung simuliert werden.

Die Kalibrierung sollte an möglichst umfangreichen Abflussdaten erfolgen, die unterschiedliche hydrologische Situationen abdecken (insbesondere solche, die für die Aufgabenstellung relevant sind). Das Extrapolationsverhalten des Modells sollte durch Vergleich der Situationen (z. B. unterschiedlich große Ereignisse) dargestellt werden. Ein Teil des Datensatzes sollte nicht für die Kalibrierung verwendet, sondern für die Validierung des Modells aufgehoben werden.

Die Eingangsdaten für die Kalibrierung und die Anwendung sollten ähnliche Eigenschaften betreffend systematischer Fehler aufweisen. Ändern sie sich, ist eine Neukalibrierung der Modellparameter erforderlich.

4.4.2. Beurteilung der Modellierungsgüte

Um bei der Kalibrierung feststellen zu können, wann die simulierte Abflussganglinie möglichst ähnlich der gemessenen Abflussganglinie ist, sind Kriterien für die Ähnlichkeit erforderlich. Diese bezeichnet man als Zielfunktionen.

Zielfunktionen beinhalten quantitative Fehler- bzw. Gütemaße, die aus einem Vergleich von simulierten und beobachteten Größen errechnet werden. Man unterscheidet absolute und relative Gütemaße. Der Vorteil der relativen Fehlermaße ist ihre Dimensionslosigkeit, wodurch sie auch zum Vergleich verschiedener Einzugsgebiete herangezogen werden können. Dennoch ist es oft sinnvoll, absolute Gütemaße zu verwenden, um den Fehler in den Einheiten der betrachteten Größen darzustellen. Die gängigsten mathematischen Fehlermaße sind in Tab. 4.2 zusammengestellt. Für Anwendungen der Wasserbilanz sind Volumenfehlermaße (BIAS) besonders wichtig. Für viele Anwendungen wird aus Gründen der Vergleichbarkeit das Gütemaß nach Nash-Sutcliffe (NSE) verwendet. Es beinhaltet einen quadratischen Term und betont dadurch die Abflussspitzen. Der Wertebereich erstreckt sich von $-\infty$ bis 1, wobei 1 eine perfekte Übereinstimmung zwischen Modell und Messung bedeutet. Wenn die Variabilität des Abflusses sehr klein ist, ist NSE nicht mehr aussagekräftig, da der Nenner des Bruches klein wird. Abb. 4.14 verdeutlicht anhand eines Vergleiches zweier Abflussganglinien Q_1 und Q_2 , wie

sich die Gütemaße NSE , R^2 und $RBIAS$ (Tab. 4.2) durch einen hypothetischen Fehler ergeben. Abb. 4.14a stellt einen multiplikativen Fehler der Ganglinie Q_1 im Vergleich zu Q_2 dar (Faktor 0,7), Abb. 4.14b einen additiven (Hinzuzählen der Hälfte des mittleren Abflusses MQ). Trotz des relativen systematischen Fehlers ($RBIAS$) von -0.7 (Abb. 4.14a) bzw. $(+1,5)$ (Abb. 4.14b) ist NSE eher gut. Zu erkennen ist auch, dass das Bestimmtheitsmaß R^2 keine systematischen Fehler erfasst ($R^2 = 1$). Erst durch die Darstellung mehrerer Gütemaße kann die Simulationsgüte zuverlässig eingeschätzt werden. In beiden Fällen sollte der systematische Fehler in der Kalibrierung ausgeglichen werden, vor allem, wenn die Erfassung der Wasserbilanz im Vordergrund steht. Manchmal werden mehrere Gütemaße kombiniert bzw. auch Gütemaße für andere Kenngrößen außer dem Abfluss (z. B. die Schneebedeckung) verwendet (Parajka et al. 2007, 2008; Kleidorfer und Rauch 2009).

Tab. 4.2 Gütemaße zur Beurteilung von Niederschlag-Abfluss-Simulationen. Diese beschreiben das Zutreffen der Wasserbilanz und der Variabilität des simulierten Abflusses Q_{sim} im Vergleich zur Beobachtung Q_{beob} , nicht jedoch die Wellenformen

Gütemaß	Abk.	Formel	Aussagekraft	Einheit	Wertebereich
Volumenfehler (Bias)	$BIAS$	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{beob}(i) - Q_{sim}(i)) = \overline{Q_{beob}} - \overline{Q_{sim}}$	Wasserbilanz	$[m^3/s]$	$[-\infty, \infty]$
Relativer Bias	$RBIAS$	$\frac{\overline{Q_{beob}} - \overline{Q_{sim}}}{\overline{Q_{beob}}}$	Wasserbilanz	$[-]$	$[-\infty, \infty]$
Mittlerer absoluter Fehler	MAE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{beob}(i) - Q_{sim}(i) $	Variabilität	$[m^3/s]$	$[0, \infty]$
Mittlerer quadratischer Fehler	MSE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{beob}(i) - Q_{sim}(i))^2$	Variabilität, betont Spitzenabflüsse	$[(m^3/s)^2]$	$[0, \infty]$
Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers	$RMSE$	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{beob}(i) - Q_{sim}(i))^2}$	Variabilität, betont Spitzenabflüsse	$[m^3/s]$	$[0, \infty]$
Bestimmtheitsmaß	R^2	$\frac{\left(\sum_{i=1}^n (Q_{beob}(i) - \overline{Q_{beob}}) (Q_{sim}(i) - \overline{Q_{sim}}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{beob}(i) - \overline{Q_{beob}})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{sim}(i) - \overline{Q_{sim}})^2}$	Variabilität, jedoch nicht die Wasserbilanz	$[-]$	$[0, 1]$
Gütemaß nach Nash-Sutcliffe	NSE	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{beob}(i) - Q_{sim}(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{beob}(i) - \overline{Q_{beob}})^2}$	Variabilität, betont Spitzenabflüsse	$[-]$	$[-\infty, 1]$

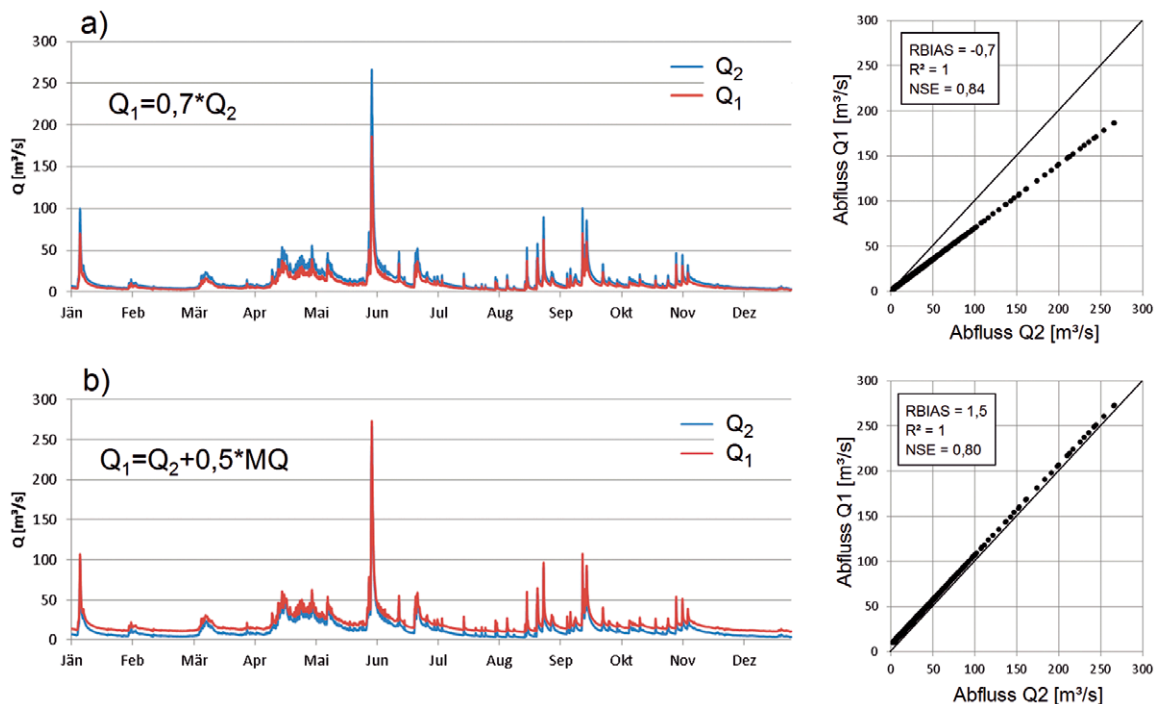


Abb. 4.14 Vergleich zweier Abflussganglinien Q_1 und Q_2 und zugehörige Gütemaße $RBIAS$, R^2 und NSE

Die Gütemaße in Tab. 4.2 machen keine Aussage darüber, ob die Wellenform gut simuliert wird. Deswegen ist eine visuelle Beurteilung immer erforderlich. Entsprechend der Kalibrierungshierarchie (Kapitel 4.2.3.) wird eine Beurteilung auf unterschiedlichen Zeitskalen empfohlen, vom Ereignis zur saisonalen Skale und zur jährlichen Skale. Auf Ereignisbasis sind die Größe und der Zeitpunkt des Auftretens des Scheitels, die Anstiegszeit und die Steilheit des Anstiegs sowie die Auslauflinie und die Höhe des Basisabflusses von Interesse. Abb. 4.15 zeigt schematisch einzelne Ganglinienindikatoren: Geprüft wird, ob die Abflussvolumina übereinstimmen, woraus Rückschlüsse auf die Abflussbildung im Modell (z. B. Ereignisabflussbeiwert) gewonnen werden, aber auch Fehler in den Eingangsdaten möglicherweise erkannt werden können. Die Neigung des Anstiegs und die Anstiegszeit geben Hinweise auf die Reaktionszeit, d. h. auf die zeitliche Dynamik von Abflussbildung und Abflusskonzentration (z. B. „Anspringen“ des Oberflächenabflusses), aber auch auf die Intensität der zugrunde liegenden Niederschläge. Wird die Neigung des Anstiegs und der Zeitpunkt des Auftretens des Scheitels mit der Simulation getroffen, lässt dies auf eine zutreffende Abbildung der Laufzeit (Verzögerungszeit) im Gebiet schließen. Gerade ein zeitlicher Versatz des Scheitels – bei richtiger Abbildung der Größenordnung der Abflussbildung – führt bei Verwendung von mathematischen Zielfunktionen wie in Tab. 4.2 häufig zu inakzeptablen Ergebnissen. Die visuelle Überprüfung der Form der Ganglinie kann dann dazu führen, dass nicht der gesamte Modellansatz bzw. der betrachtete Parametersatz verworfen werden muss, sondern nur einzelne Parameter der Abflusskonzentration verändert werden müssen.

Der Bewertung von Auslauflinien nach einem Ereignis kommt eine besondere Bedeutung zu: Im Bereich von Auslauflinien entfällt der Einfluss des Niederschlags, der mitunter während Ereignissen große Unsicherheiten aufweisen kann und daher in diesen Phasen die Beurteilung der Simulationsgüte erschwert (Unterscheidung Inputfehler oder Modellfehler). In der Auslauflinie wird das Speicherverhalten eines Einzugsgebiets, welches eine sehr wichtige Größe zur Beschreibung der Einzugsgebietscharakteristik (Böden, Geologie) darstellt, direkt abgebildet. Das Speicherverhalten findet sich in vielen Modellparametern, die identifiziert werden müssen, z. B. in den Zeitparametern der Bodenspeicher oder in den Austauschraten zwischen verschiedenen Boden- und Grundwasserspeichern.

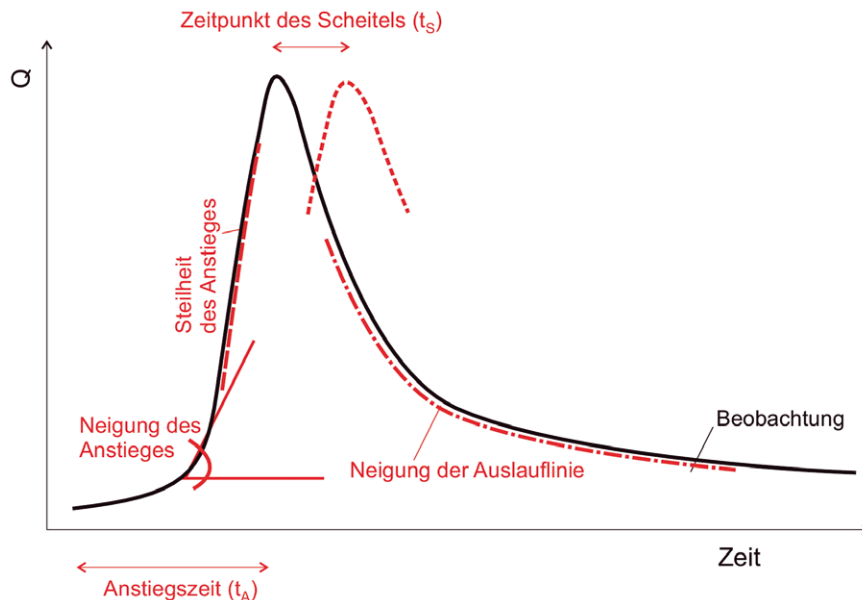


Abb. 4.15 Typische Ganglinieneigenschaften von Ereignissen zur Beurteilung der Modellierungsgüte

Auch auf saisonaler Basis können verschiedene Ganglinieneigenschaften in die Zielfunktion einfließen. Abb. 4.16 zeigt schematisch eine Jahresabflussreihe. Eine saisonal differenzierte Auswertung konzentriert sich erstens auf die Phase der Schneeschmelze und deren Einfluss auf die darauffolgenden Zeiträume (feuchte Bedingungen im Einzugsgebiet). In dieser Phase kann vor allem der Fokus auf die Parameter im Schneemodul, aber auch auf die Parameter, welche für die Abflussbildung und -konzentration bei feuchten Bedingungen im Gebiet signifikant sind, gelegt werden. Einen Hinweis auf Schneeschmelzprozesse gibt oft der typische Tagesgang in der Abflussganglinie an einem Pegel, hervorgerufen durch die stärksten Schmelzraten temperaturbedingt am frühen Nachmittag und mit entsprechender Reaktion am Pegel, d. h. Gebietsauslass, abhängig von der Konzentrationszeit.

Zweitens sind die langfristigen Auslauflinien und der Basisabfluss Indikatoren für die richtige Abbildung des Grundwasserabflusses in einem Gebiet mit dem Modell. Vor allem bei größeren Differenzen von Hoch- und Niedrwasser hilft oft eine logarithmische Darstellung der simulierten und beobachteten Ganglinie zur Identifikation von Abweichungen im Basisabfluss. In vielen Modellen werden Speicheransätze verwendet, welche als Parameter die Zeitkonstanten der einzelnen Grundwasserspeicher und die Austauschraten zwischen den Speichern enthalten.

Des Weiteren kann auf der saisonalen Skala die unterschiedlich wirksame Verdunstung und deren Einfluss auf die Bodenfeuchtebedingungen analysiert werden, wodurch die Abflussbildung beeinflusst wird. Eine saisonal differenzierte Betrachtung erleichtert die Parameteridentifikation, da nicht jeder Parameter in jeder Phase bzw. bei jeder hydrologischen Situation signifikant sein muss.

Da eine mathematische Formulierung dieser Zielgrößen mitunter schwierig ist, werden diese meist bei einer qualitativen Beurteilung der Simulationsgüte herangezogen. In diesem Fall erfolgt die Einschätzung der Simulationsgüte aus einem visuellen Vergleich von simulierter und beobachteter Ganglinie in den Phasen, die für die Fragestellung maßgeblich sind (z. B. Hochwasser, Wasserbilanz etc.). Zusätzlich kann getrennt davon eine statistische Analyse der Fehler- bzw. Differenzganglinien, wie zum Beispiel für die der Hochwasservorhersage, erfolgen. Als weitere Darstellungsformen können auch Histogramme oder kumulative Verteilungsfunktionen dienen.

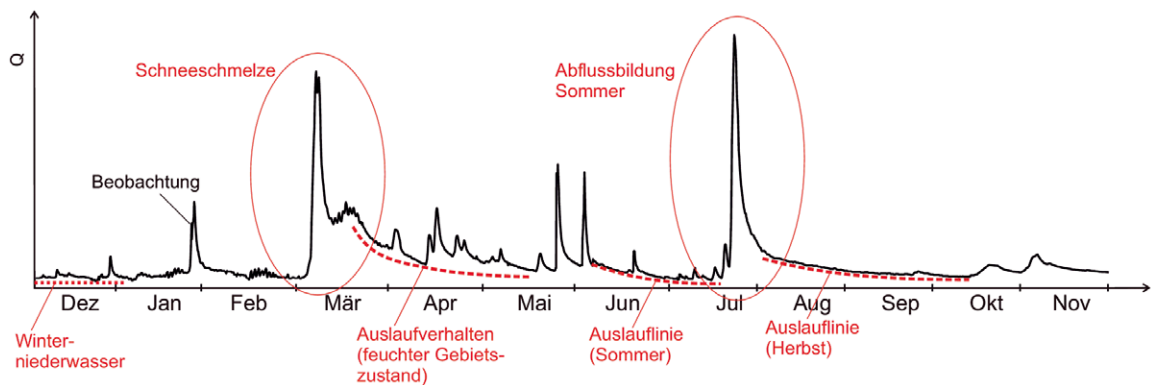


Abb. 4.16 Typische Ganglinieneigenschaften auf der saisonalen Skale zur Beurteilung der Modellierungsgüte

BOX 4.8: Beurteilung der Modellierungsgüte

Es wird jedenfalls eine visuelle Beurteilung der Modellierungsgüte empfohlen, in Hinblick auf die Form der Ganglinien, im Besonderen die Neigung der Auslauflinie, Zeitpunkt und Größe der Abflussscheitel und den saisonalen Verlauf des Abflusses. Für Vergleichszwecke mit anderen Studien und für die automatische Kalibrierung sind das Gütemaß nach Nash-Sutcliffe und der RMSE sinnvoll, obwohl sie die Struktur der Abflussganglinie nicht berücksichtigen. Der BIAS ist ein sinnvolles Gütemaß, das Aufschluss darüber gibt, ob die Wasserbilanz geschlossen ist. Bei der Angabe von Gütemaßen ist auch der betrachtete Zeitraum anzugeben.

4.4.3. Manuelle Kalibrierung

Bei manueller Kalibrierung werden die Parameter von Hand geändert, um gemäß dem „Trial & Error“-Prinzip eine Verbesserung der Simulationen zu erzielen. Die Methodik kann bei komplexen, flächendetaillierten Modellen mit vielen Parametern sehr aufwendig werden. Gegenüber der automatischen Kalibrierung besitzt die manuelle Kalibrierung allerdings den Vorteil, dass qualitative Zusatzinformationen aus der Gebietskenntnis („soft data“) und hydrologisches Expertenwissen einbezogen werden können. Je nach Einschätzung des Modellierers werden einzelne Parameter dabei unverändert gelassen oder nur in physikalisch plausiblen Rahmen variiert, und die betrachteten Parameter bzw. die Prozesse, die sie beschreiben sollen, können direkt im Zuge der Kalibrierung hydrologisch interpretiert werden. Vor allem wenn die Anpassung der Simulation an die Beobachtung in bestimmten Phasen nicht gelingt – oder nur unter Verwendung von unplausiblen Parameterwerten –, können diese Phasen direkt bei der Kalibrierung analysiert werden (Kontrolle der Eingangs- und Abflussvergleichsdaten).

Neben dem Vergleich von simulierten und beobachteten Abflüssen kann hierzu auch eine Analyse von simulierten Modellzustandsgrößen, wie Bodenfeuchte, Bodenspeicherstände, Grundwasserstände, Schneewasseräquivalent etc. dienen, für welche auch manchmal Messdaten – in der Regel punktuell und nicht flächenhaft – vorhanden sind. Der sich unter Verwendung eines bestimmten Parametersatzes ergebende zeitliche Verlauf wird dabei – eventuell unter Berücksichtigung repräsentativer Punktdaten – aus hydrologischen Gesichtspunkten interpretiert und gegen die Gebietskenntnis getestet.

Bei flächendetaillierten Modellen sollen auch die räumlichen Muster der entsprechenden hydrologischen Größe mit flächenhaften Daten (z. B. MODIS-Daten) verglichen (Differenzkarten) oder nach Auswahl relevanter Zeitpunkte („Snapshots“) qualitativ aus der Gebietskenntnis auf ihre Plausibilität interpretiert werden. Grayson und Blöschl (2000b) geben dafür detaillierte Vorgangsweisen an.

Abb. 4.17 zeigt ein Beispiel für eine *manuelle* Kalibrierung anhand von Simulationen zur Zeit der Schneeschmelze mit dem Modell KAMPUS, in welchen zur Beschreibung der Schneeschmelze das Grad-Tag-Verfahren implementiert ist. Das oberste Diagramm zeigt die Niederschläge, das unterste die Abflüsse, und zusätzlich sind im mittleren Diagramm simulierte Schneewasserwerte (SWE) mit an Stationen beobachteten Schneehöhen verglichen. Daten von Schneehöhen werden herangezogen, um den Abschmelzvorgang im Modell zu kontrollieren. Das Beispiel zeigt zwei Simulationsergebnisse, erstens eine Simulation anhand eines Grad-Tag-Faktors (GTF), entnommen aus einer früheren, regionalen Studie (Merz 2002), und zweitens eine Simulation nach einer Feinjustierung bzw. Kalibrierung. Anhand des *A-priori*-Wertes aus der regionalen Studie wird der Abfluss während der Schmelze relativ stark überschätzt, und auch der Vergleich des simulierten SWE mit den beobachteten Schneehöhen zeigt den zu raschen Abschmelzvorgang. Die simulierten Schneewasserwerte fallen vom 7. bis 11. April steiler ab als die beobachteten Schneehöhen. Der simulierte Trend wird hier relativ zu jenem der gemessenen Werte interpretiert, da die Schneedichten in diesem Fall nicht bekannt sind und die gemessenen Schneehöhen daher nicht in Wasserwerte umgerechnet werden können. Bei Neuschnee beträgt die Dichte ungefähr 0.1 kg/dm^3 , d. h. der Schneewasserwert in mm entspricht ungefähr der Schneehöhe in cm. Dies ist im vorliegenden Beispiel am Beginn der Schneeschmelzperiode der Fall. Aus beiden Abbildungen geht in konsistenter Weise hervor, dass der GTF in diesem Fall verringert werden muss. Nach der Kalibrierung stimmt sowohl die Neigung des simulierten SWE mit jener der beobachteten Schneehöhen als auch die simulierte Dynamik der Abflüsse mit den Daten überein. Bei zeitlich hoch aufgelösten Modellen, wie im vorliegenden Beispiel, bildet die Nachbildung des typischen Tagesgangs in den Abflüssen einen Schwerpunkt der Kalibrierung.

Im vorliegenden Beispiel kann durch Variation des vorab gewählten GTF die Simulation signifikant verbessert, d. h. die systematischen Fehler reduziert werden. Durch Heranziehen von Schneedaten werden zusätzliche, von Niederschlag und Abfluss unabhängige Daten einbezogen, um das Schneemodell zu kalibrieren. Im Zuge einer Schneeschmelzsimulation kann es aber auch dazu kommen, dass die Neigung des Rückgangs des SWE (Schmelze) in Simulation und Beobachtung gut getroffen wird, jedoch die Abflüsse unterschätzt werden bzw. – bei zeitlich höher aufgelösten Modellen – kein Tagesgang der Abflüsse mehr simuliert wird. In diesem Fall lässt dies auf eine generelle Unterschätzung der Schneemenge am Beginn der Schneeschmelze im Modell, also auf Fehler in den Eingangsdaten (Messfehler bei Schneefall, siehe Kapitel 2.2.) oder im Modell zur Schneeakkumulation (Schneefallgrenze) schließen.

Abb. 4.18 zeigt einen Vergleich von simulierten Schneemustern unter Verwendung von interpolierten Schneehöhen im Gebiet des Kamp während des in der vorangegangenen Abb. 4.17 beschriebenen Ereignisses als Beispiel für eine Plausibilitätskontrolle der Schneesimulation. Das Ausapern im Osten und die größere Schneerücklage in den höheren Gebietsteilen im Westen werden richtig wiedergegeben. Bei Annahme einer typischen Schneedichte erscheint das simulierte Schneewasseräquivalent im Vergleich zu den interpolierten Schneehöhendaten im Westen des Gebietes zwar etwas hoch, doch können solche Unterschiede auch durch Unsicherheiten bei der Messung und Interpolation der Schneehöhen verursacht sein. Vergleiche wie in Abb. 4.18 deuten darauf hin, dass die simulierten Schneemuster tendenziell ein zu spätes Ausapern ergeben, weshalb der Gradtagfaktor GTF in diesem Schritt geringfügig erhöht werden müsste. Der Mustervergleich erlaubt also auch eine Feinabstimmung dieses Modellparameters.

Weitere Beispiele für Verwendung von Fernerkundungsdaten (MODIS) in Österreich geben beispielsweise Parajka und Blöschl (2008b) und Nester et al. (2012). In diesen Fällen kann die Ausdehnung der schneebedeckten Fläche, nicht jedoch die Dynamik der simulierten Schneewasserwerte überprüft werden.

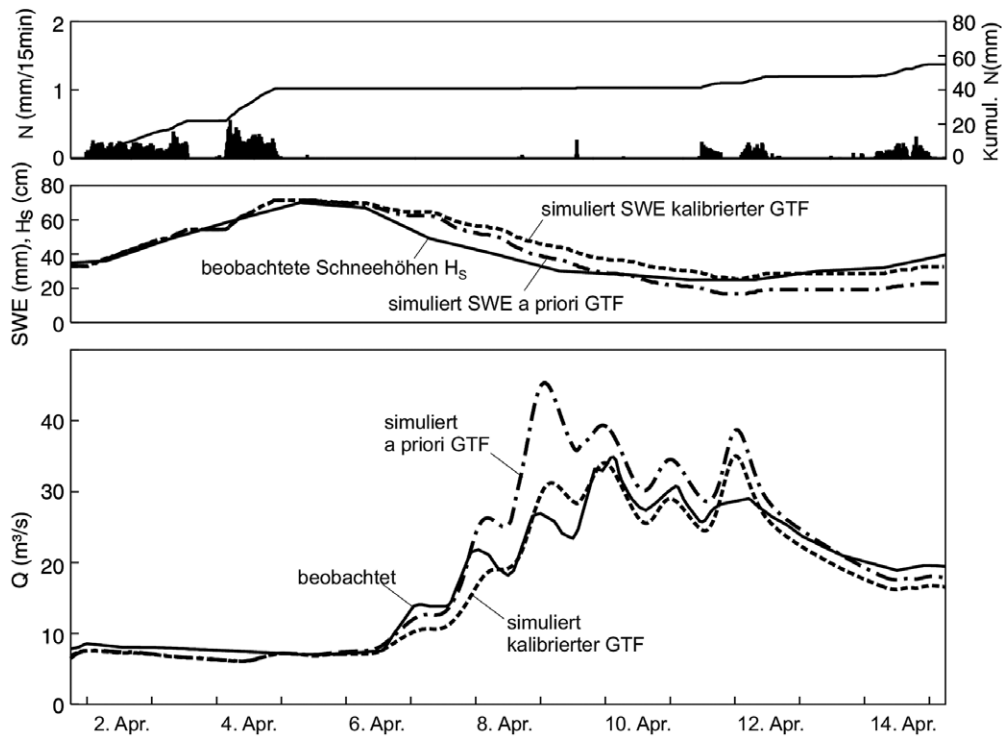


Abb. 4.17 Beispiel für die Überprüfung der Wirkung unterschiedlicher Grad-Tag-Faktoren (GTF) im Modell: Vergleich von Simulationen mit A-priori-Werten des GTF und Simulationen nach der Kalibrierung (Kamp, Zwettl-Bahnbrücke, Modell KAMPUS, April 1996)

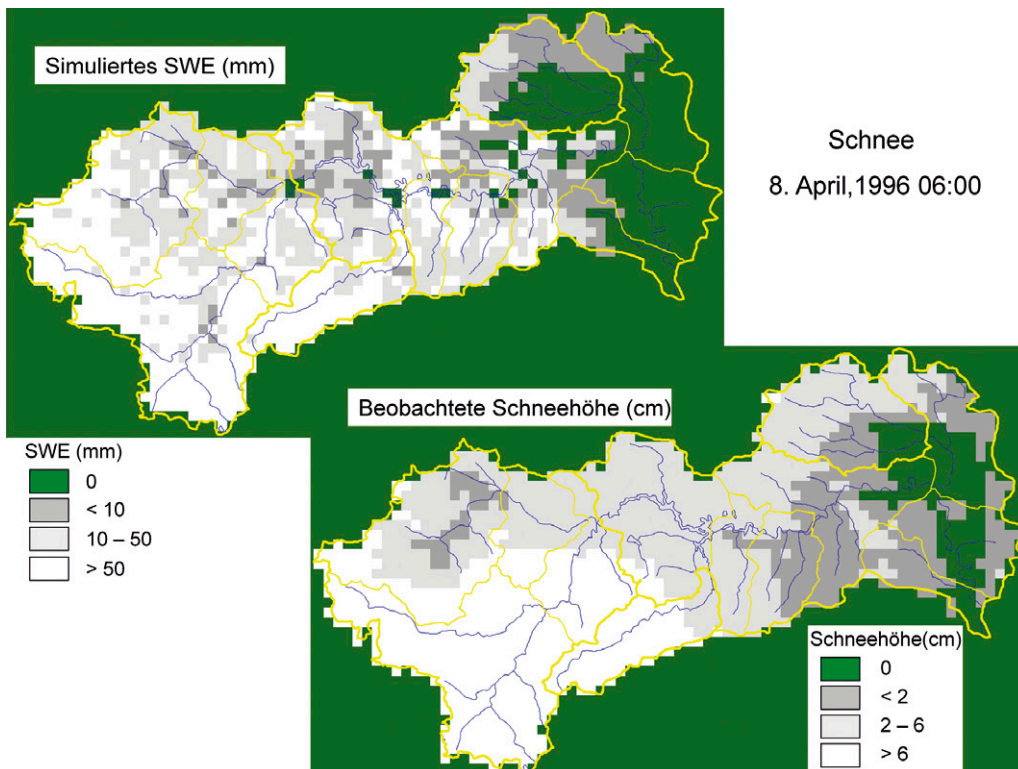


Abb. 4.18 Beispiel für die Plausibilitätskontrolle der simulierten Muster während des Ereignisses in Abb. 4.17. Simulierte Schneeverteilung (Schneewasseräquivalent SWE) und aus Punktdaten (10 Stationen) interpolierte Schneehöhenverteilung am 8. April 1996, 06:00. Zwettl-Bahnbrücke, Modell KAMPUS (Reszler et al. 2006a)

BOX 4.9: Manuelle Kalibrierung

Es wird empfohlen, bei der manuellen Kalibrierung quantitative und qualitative Zusatzinformationen über die hydrologischen Prozesse im Gebiet einzubeziehen.

Bei der Anwendung der Kalibrierungshierarchie und des Konzeptes der dominanten Prozesse sind, je nach Betrachtungszeitraum und Region, die entsprechend sensitiven Parameter getrennt zu kalibrieren und sonst festzuhalten.

4.4.4. Automatische Kalibrierung

Bei der automatischen Kalibrierung werden die Modellparameter über Optimierungsalgorithmen automatisch durch Minimierung (oder Maximierung) der Zielfunktion angepasst. Die Optimierung sollte nicht ausschließlich nach bestem Optimierungskriterium, sondern auch hydrologisch sinnvoll und ausgerichtet auf die Fragestellung durchgeführt werden. Hohes Augenmerk ist auf eine A-priori-Abschätzung der Bandbreite der Parameter zu legen. Eine Ausweisung bzw. Dokumentation der kalibrierten Parameter und eine Einschätzung der physikalischen Interpretierbarkeit bzw. Plausibilität ist sinnvoll. Vor allem, wenn bei der Optimierung bestimmte Parameter immer am äußersten Rand der vordefinierten A-priori-Bandbreite zu liegen kommen, ist Vorsicht geboten. Hierfür ist die Kenntnis über die vorgesehene Wirkung der Parameter in der generellen Modellstruktur bzw. in den Modellgleichungen notwendig (aus Sensitivitätsanalyse, Literatur). Ebenso wie bei der manuellen Kalibrierung führt in komplexen Modellen die Auswahl von sensitiven Parametern und das Festhalten von in bestimmten Situationen nicht sensitiven Parametern zu einer Erleichterung und Verbesserung der Übersichtlichkeit der Kalibrierung. Bezüglich des Konvergierens der Optimierungsalgorithmen ist vor allem die Überprüfung von Korrelationen zwischen den Parametern sehr wichtig (siehe Kapitel 4.4.5.). Zur automatischen Kalibrierung kann eine Vielzahl unterschiedlicher Algorithmen angewendet werden. Dazu werden verschiedene Softwareprodukte am Markt angeboten (z. B. PEST http://www.pesthomepage.org/Global_Optimizers.php; SCE-UA <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7671-shuffled-complex-evolution--sce-ua--method>). Bei der Anwendung sind einige Punkte zu beachten:

- Es zeigt sich oft, dass die aus einer automatischen Kalibrierung gewonnenen Parameter zwar die für die Kalibrierung herangezogenen Abflussdaten optimal beschreiben, jedoch bei der Extrapolierbarkeit des Gebietsverhaltens und der Plausibilität der Prozessbeschreibungen Defizite auftreten können. Dem Split-Sample-Test kommt in dieser Hinsicht besondere Bedeutung zu (Kapitel 5.1.).
- Die resultierenden Parametersätze sind optimiert in Hinblick auf die gewählte Zielfunktion. Bei der automatischen Kalibrierung beeinflusst daher die Wahl der Zielfunktion maßgeblich die Güte der Ergebnisse. Sie sollte vor allem auf die vorgegebene Fragestellung (Zielgrößen der Modellsimulation) abgestimmt sein. Beispielsweise ergibt eine Optimierung der Parameter auf die Wasserbilanz (unter Verwendung von BIAS, Tab. 4.2) meist andere Werte als bei Optimierung auf Abflussspitzen (unter Verwendung von NSE, Tab. 4.2). Dies ist in Abb. 4.19 und Abb. 4.20 beispielhaft dargestellt.
- Optimierungsalgorithmen reagieren sehr empfindlich auf Fehler in den Eingangsdaten. Dies führt oft dazu, dass die Parameterwerte in unterschiedlichen Kalibrierungsperioden um eine Größenordnung unterschiedliche bzw. auch unplausible Werte annehmen.
- Generell konvergieren Algorithmen schneller, wenn der Parameterbereich eingeschränkt wird.
- Parameter, die durch automatische Optimierungsalgorithmen bestimmt wurden, können z. B. aufgrund von Korrelationen mit anderen Parametern ihre Bedeutung wie im Modellkonzept vorgesehen bzw. ihre physikalische Bedeutung verlieren.

Deswegen wird manchmal die automatische Kalibrierung in Verbindung mit manueller Kalibrierung eingesetzt.

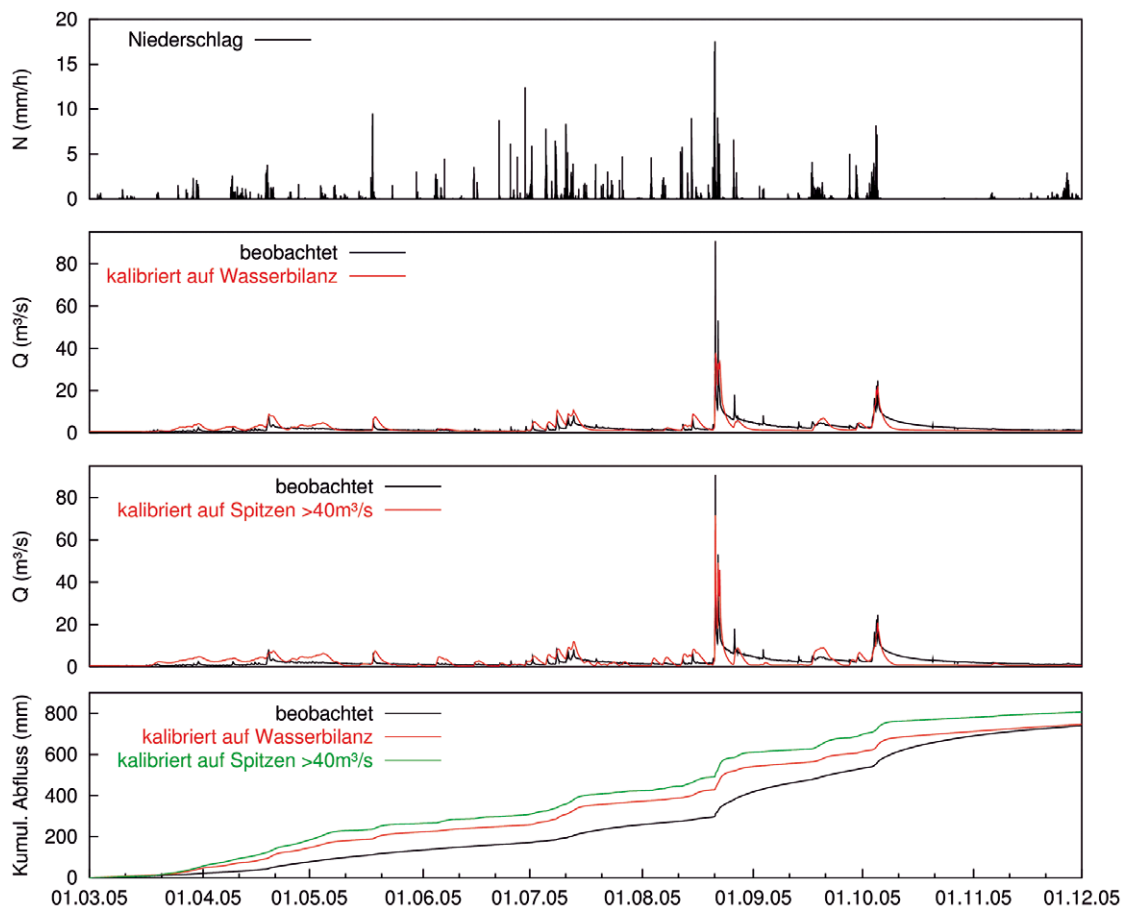


Abb. 4.19 Beispiel für unterschiedliche automatische Kalibrierungsergebnisse mit einem einfachen konzeptionellen Niederschlag-Abfluss-Modell (Blockmodell NAM) bei Verwendung unterschiedlicher Zielfunktionen (Wasserbilanz und RMSE von Spitzen über 40 m³/s)

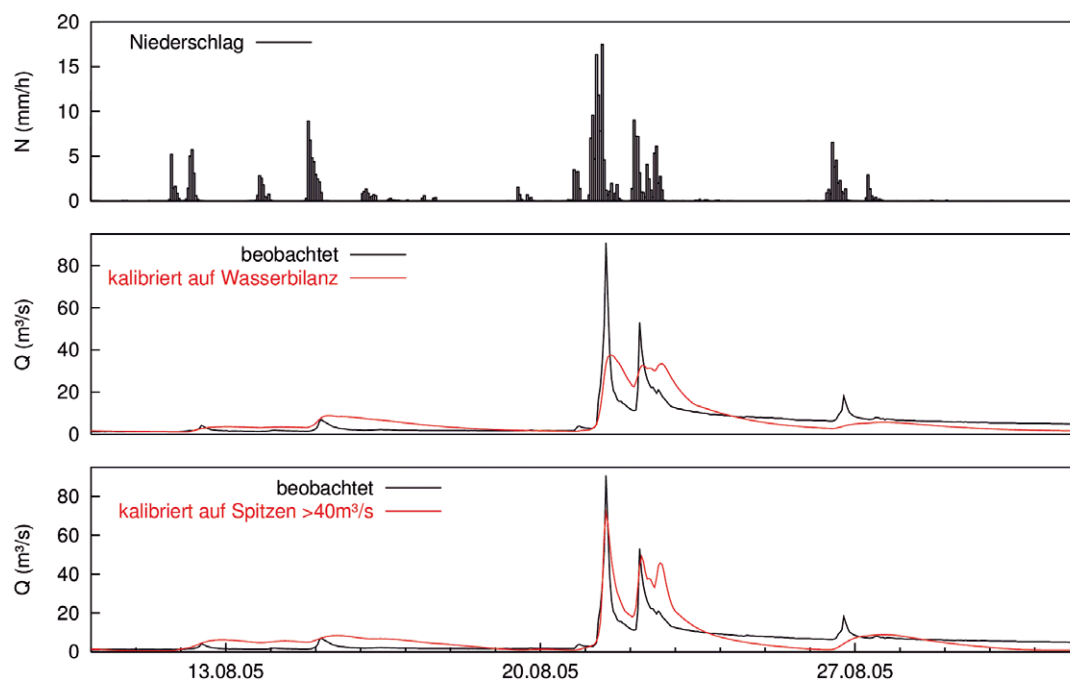


Abb. 4.20 Ausschnitt aus Abb. 4.20: Ereignis im August 2005. Die Kalibrierung auf Abflussspitzen erzielt eine bessere Anpassung dieser Spitzen. In beiden Fällen ist die Anpassung an die Wellenform nicht zufriedenstellend, da die Auslaufkurve nicht richtig wiedergegeben wird

BOX 4.10: Automatische Kalibrierung

Es wird empfohlen, bei der automatischen Kalibrierung die Wahl der Zielfunktion auf die vorgegebene Fragestellung abzustimmen, hohes Augenmerk auf eine A-priori-Abschätzung der Bandbreite der Parameter zu legen und die Parameter hydrologisch zu interpretieren bzw. plausibilisieren. Hierfür ist die Kenntnis über die vorgesehene Wirkung der Parameter in der generellen Modellstruktur bzw. in den Modellgleichungen notwendig. Berücksichtigung quantitativer Zusatzinformationen (z. B. Schneekarten) über die hydrologischen Prozesse im Gebiet wird empfohlen.

4.4.5. Überparametrisierung

Je größer die Komplexität des Modells ist, desto mehr Freiheitsgrade stehen bei der Kalibrierung der Parameter zur Verfügung. Die Komplexität betrifft sowohl die räumliche Gliederung (siehe Kapitel 3.2.2.) als auch die verwendeten Berechnungsansätze (siehe Kapitel 3.3.). Eine große Anzahl von Teilflächen und von Modellparametern erhöht die Modellkomplexität und damit die Anzahl der Freiheitsgrade. Betrachtet man die tatsächlich verfügbaren Daten und Information über die Prozesse im Gebiet, ist eine solche Komplexität aber oft nicht gerechtfertigt. Insbesondere haben viele Modelle zu viele Parameter bzw. stark korrelierte Parameter. Letzteres bedeutet, dass sie voneinander abhängig sind bzw. den gleichen Prozess beschreiben. Zum Beispiel spiegelt der Abflussbeiwert auch die Ausdehnung von abflussbeitragenden Flächen in einem Einzugsgebietsmodell wider, d. h. er kann auch als ein flächenhafter Faktor aufgefasst werden. Bei Hydrotop- oder Teilgebietsmodellen stehen die Größe eines Hydrotops bzw. Teilgebiets und der Abflussbeiwert auf dieser Fläche miteinander in Relation, denn beide bestimmen den zum Direktabfluss kommenden Niederschlag. Die Schwierigkeit bei korrelierten Parametern ist, dass sie nicht einzeln aus dem gemessenen Abfluss kalibriert werden können. In diesem Fall ist es notwendig, einen der beiden Parameter über die Gebietseigenschaften abzuleiten und in der Kalibrierung unverändert zu lassen. Im obigen Beispiel wäre das die Hydrotop- bzw. Teilgebietsfläche, die etwa durch GIS-Verschneidung von digitalen Karten definiert werden kann. Die Kalibrierung erfolgt daher vorerst primär über die Abflussbeiwerte. Sollten sich hingegen in der Kalibrierung unplausible Abflussbeiwerte ergeben, ist auch die beitragende Fläche zu hinterfragen.

Überparametrisierung führt dazu, dass es aus den vorhandenen Daten nicht möglich ist, jeden Parameter eindeutig aus dem Abfluss zu kalibrieren. In Abb. 4.21 ist schematisch die Modellgüte in Abhängigkeit von den vorhandenen Daten und der Modellkomplexität dargestellt. Mit zunehmender Modellkomplexität ist auch ein zunehmender Datenumfang notwendig, um die Parameter so zu bestimmen, dass das Modell prognosefähig ist. Es existiert ein Maximum an Modellkomplexität, ab welchem die Modellgüte nicht mehr entscheidend verbessert wird bzw. sogar abnehmen kann, wenn das Modell nur die Kalibrierdaten beschreibt aber nicht die Prognosesituation.

Zur Erkennung von Überparametrisierung dienen in erster Linie Sensitivitätsanalysen (siehe auch Kapitel 6.1.2.). Damit kann überprüft werden, wie groß der Einfluss eines Parameters auf die Modellgüte ist. Geklärt wird dabei auch der Zusammenhang zwischen den Parametern. Zudem kann die Änderung der Modellgüte zwischen Kalibrierungs- und Validierungszeitraum (Split-Sample-Test) verglichen werden (siehe Kapitel 5.1.). Sinkt die Modellgüte im Validierungszeitraum gegenüber dem Kalibrierungszeitraum stark ab, ist dies oft ein Hinweis auf Überparametrisierung.

Ansätze zur Verbesserung von überparametrisierten Modellen zielen im Wesentlichen darauf ab, die Anzahl der zu kalibrierenden Modellparameter zu reduzieren. Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten, die getrennt oder gemeinsam verwendet werden können.

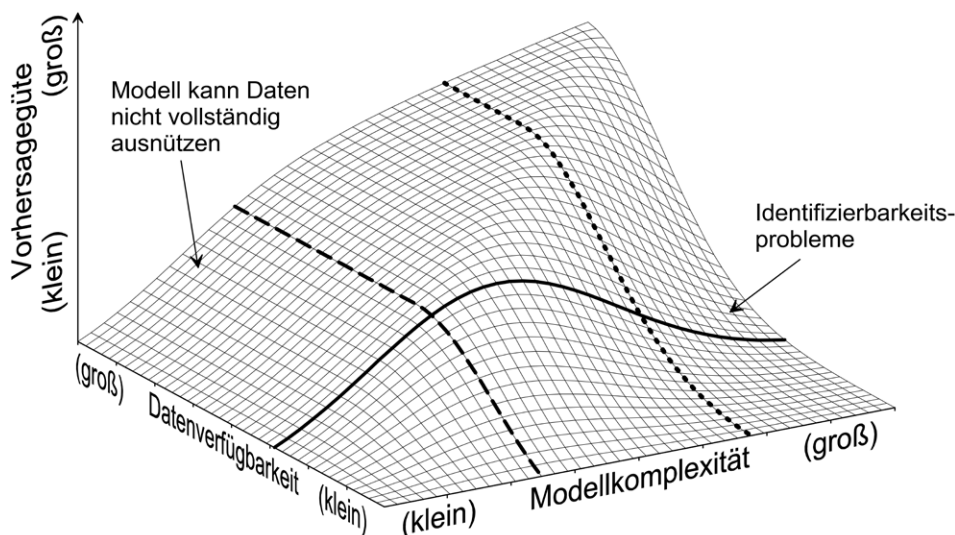


Abb. 4.21 Modellgüte in Abhängigkeit von Datenverfügbarkeit und Modellkomplexität (Grayson und Blöschl 2000)

- Parameter mit geringem Einfluss auf die Modellgüte werden a priori festgelegt bzw. vernachlässigt. Im Zuge des Kalibrierungsprozesses mit angeschlossener Sensitivitätsanalyse wird festgelegt, welche Parameter kalibriert und welche Parameter fixiert werden.
- Definition von plausiblen Grenzen für die Kalibrierung einzelner Parameter. Je enger die Grenzen, desto größer die Reduktion der Überparametrisierung.
- Parameter werden durch Proxy-Information (Information über Vegetation, Bodenmächtigkeit etc.) statt durch eine Kalibrierung am Abfluss festgelegt.
- Reduktion der räumlichen Auflösung des Modells bzw. Konstanthalten von Parametern in Teilgebieten.

Insgesamt gibt es einen Abwägungsprozess zwischen der Modellkomplexität bzw. der Anzahl der zu kalibrierenden Parameter einerseits und der Anpassungsfähigkeit des Modells an den beobachteten Abfluss andererseits. Wird die Anzahl der zu kalibrierenden Modellparameter zu stark reduziert, lässt sich die simulierte Abflussganglinie nicht mehr gut an die Abflussdaten anpassen. Ist die Anzahl der zu kalibrierenden Modellparameter zu groß, kann die Prognose deutlich schlechter als die Modellkalibrierung werden.

BOX 4.11 Überparametrisierung

Es wird empfohlen, eine Überparametrisierung des Modells zu reduzieren, falls diese vorliegt. Überprüft kann das durch Split-Sample-Test (Kapitel 5.) und Sensitivitätsanalysen (Kapitel 6.) werden. Die Reduktion der Überparametrisierung erfolgt durch Konzentrieren der Kalibrierung auf die Parameter mit großem Einfluss auf die Modellgüte.

4.5. Parameter für Gebiete ohne Abflussdaten

Stehen im Untersuchungsgebiet keine Abflussdaten zur Verfügung, können die Modellparameter nicht durch Kalibrierung am Abfluss gewonnen werden und alternative Methoden sind erforderlich. Blöschl et al. (2013b) schlagen dafür eine schrittweise Vorgangsweise vor (Abb. 4.22). Ausgangspunkt sind Feldbegehungen, um damit die Abflussprozesse einzuschätzen. Darauf folgt eine Beurteilung der hydrologischen Ähnlichkeit zwischen dem Untersuchungsgebiet und Nachbargebieten, in denen Abflussdaten vorliegen. Auf dieser Basis können Modellparameter räumlich übertragen werden. Die damit durchgeführten Abflusssimulationen werden hydrologisch interpretiert und zuletzt die Unsicherheiten beurteilt. Diese Schritte können iterativ durchgeführt werden. Einen Überblick gibt Blöschl (2005, 2016).

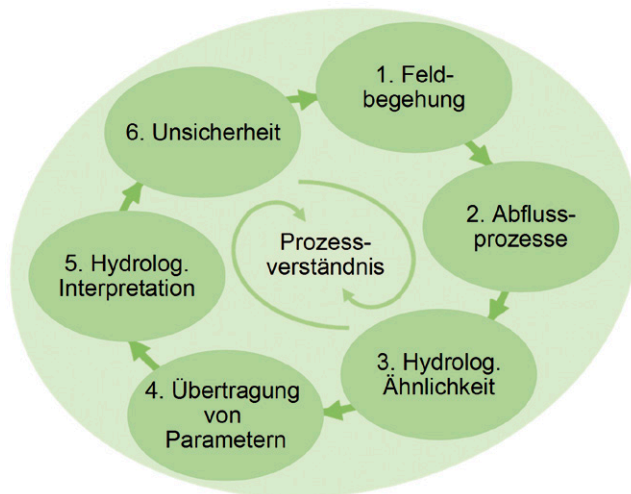


Abb. 4.22 Empfehlung zur schrittweisen Vorgangsweise zur Abflussmodellierung in Gebieten ohne Abflussdaten (Blöschl et al. 2013b)

Je nach Datenlage kommt den einzelnen Schritten unterschiedliches Gewicht zu.

Fall 1: Vergleichbare Abflussdaten in der Umgebung sind nicht vorhanden. Dies trifft vor allem auf kleine Einzugsgebiete zu. In diesem Fall kommt der Vorabschätzung von A-priori-Parametern eine große Bedeutung zu, da diese oft direkt für die Simulation verwendet werden (siehe auch Blöschl 2005). Die Schritte 3 und 4 sind weniger wichtig.

Fall 2: Vergleichbare Abflussdaten in der Umgebung sind vorhanden. Dies trifft vor allem auf größere Einzugsgebiete zu. Die Schritte 3 und 4 sind entsprechend wichtiger. Eine Kalibrierung erfolgt in benachbarten Gebieten (mit Abflussdaten) und anschließender Parameterübertragung. Dazu bedarf es der Einschätzung der Übertragbarkeit der Parameter, die auf Basis der hydrologischen Ähnlichkeit der Einzugsgebiete zu beurteilen sind.

Abb. 4.23 gibt eine detailliertere Darstellung der Möglichkeiten der Bestimmung von Parametern in unbeobachteten Einzugsgebieten. Neben A-priori-Parametern aus Gebietseigenschaften (a) und räumlicher Übertragung kalibrierter Parameter aus Nachbargebieten (b), kann die Parameterbestimmung durch regionalisierte Abflusskenngrößen (z. B. mittlerer Jahresabfluss, Verdunstung) erleichtert werden (c). Schließlich können dynamische Zusatzinformationen wie Schneemuster und Sättigungsflächen zur Parameterbestimmung herangezogen werden (d).

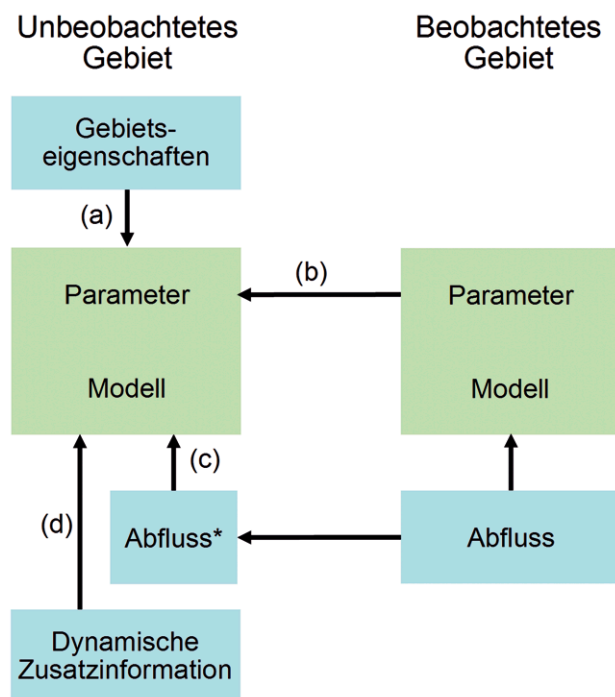


Abb. 4.23 Schematische Darstellung von Möglichkeiten zur Bestimmung von Modellparametern in unbeobachteten Einzugsgebieten: (a) A-priori-Bestimmung von Modellparametern aus Gebiets-eigenschaften, (b) Übertragung von kalibrierten Modellparametern aus beobachteten Einzugsgebieten, (c) Beschränken von Modellparametern durch regionalisierte Abflusseigenschaften* (z. B. mittlerer Jahresabfluss), (d) Beschränken von Modellparametern durch dynamische Zusatzinformationen (z. B. Schneemuster) (Blöschl et al. 2013b)

Die hydrologische Ähnlichkeit für die Übertragung von Parametern zwischen Einzugsgebieten ((b) in Abb. 4.23) wird i. A. durch folgende Kenngrößen bzw. Einflussfaktoren auf das Abflussgeschehen eingeschätzt: Klima, Geologie, Gebietsgröße, Topografie (Hangneigung, Form, Seehöhe), Boden und Vegetation, Niederschlag. Eine Übersicht über Beispiele der von diesen Eigenschaften betroffenen Parameter zeigt Tab. 4.3. Parameter lassen sich aus Nachbargebieten dann besser übertragen, wenn die hydrologische Ähnlichkeit in diesem Bereich besser zutrifft.

Vor allem die Eigenschaften hinsichtlich Boden und Geologie bestimmen die Prozesse Abflussbereitschaft, Retention, Speichereigenschaften etc. Die Vergleichbarkeit kann durch geologische Karten, Bodenkarten und Begehungen, das Vorhandensein von Erosionsspuren und die Ausbildung des Gerinnenetzes in einem Gebiet beurteilt werden. Abb. 4.24 zeigt ein Beispiel von sichtbar unterschiedlichen Gebietsformen in zwei benachbarten Einzugsgebieten. Das linke Bild zeigt einen steilen Hang mit eingeschnittenen Erosionsrinnen sowie kleinen Rutschungen, die auf ein hydrologisch sehr aktives, rasch reagierendes Verhalten hindeuten (Oberflächenabfluss). Hingegen zeigt das rechte Bild im benachbarten Einzugsgebiet wesentlich flacheres Gelände, wobei die Geländeoberfläche auch im Bereich der Gerinne bewachsen ist (Moos, Gras). Fels und nackte Steine sind kaum sichtbar. Anzeichen von Oberflächenfließen sind nicht zu sehen, was auf eine viel langsamere Abflussreaktion hindeutet. Aufgrund der unterschiedlichen Situation in diesem Beispiel würde eine Übertragung von Parametern (z. B. Abflussbeiwert, Speicherparameter) auch trotz geografischer Nähe nicht zulässig sein, bzw. müssten die Unterschiede berücksichtigt werden.

Abb. 4.25 zeigt unterschiedliche Typen von Böden, abhängig von der vorherrschenden Geologie, welche bei Hanganschnitten z. B. bei Forststraßen sehr gut beobachtet werden können. Auf diesen Flächen sind gänzlich unterschiedliche Prozesse für die Abflusstentstehung und -reaktion maßgebend, und somit sind auch vor allem die Speicherparameter unterschiedlich zu wählen. Abb. 4.25a zeigt einen recht mächtigen Almboden auf Kristallin mit gut erkennbarer Humusaufgabe. Der Boden ist mäßig durchlässig und besitzt gute Speichereigenschaften, was auf leicht verzögerte Abflussreaktion mit einem relativ hohen Anteil an Zwischenabfluss

hindeutet (Untergrund Kristallin, verwittert). Abb. 4.25b zeigt ein Beispiel einer Felswand (Karbonat) mit sehr geringer Bodenauflage. Das Karbonat ist durchlässig, wenn es – wie im vorliegenden Fall – mit sichtbaren Klüften verkarstet ist. Der Bodenspeicher ist sehr gering, wodurch die Versickerung und die Speicherung in den Feinklüften in tieferen Schichten dominieren. Allerdings kann auf weniger verkarsteten Flächenteilen der Anteil von Oberflächenabfluss höher sein. Schließlich zeigt Abb. 4.25c eine Fläche mit Karbonatschutt (in verkarstem Gebiet) ohne signifikante Bodenauflage. Der Boden und das Untergrundmaterial sind höchst durchlässig, Oberflächenabfluss tritt nicht auf.

Tab. 4.3 Hydrologische Ähnlichkeit und Übertragbarkeit von Modellparametern von Gebieten mit Abflussdaten auf Gebiete ohne Abflussdaten

Hydrologische Ähnlichkeit (Gebietseigenschaft)	Ähnlichkeit der Modellparameter
Infiltrationsvermögen (Boden) im Vergleich zum Niederschlag	Infiltrationsparameter, Abflussbeiwerte
Speichervermögen des Gebietes (Boden, Geologie, Aquifer)	Speicherparameter
Lage des Grundwasserspiegels	Speicherparameter und Abflussbeiwert
Laufzeiten (Topografie, Rauigkeiten)	Laufzeitparameter an der Oberfläche und im Untergrund
Retention des Gerinne (Ausuferung)	Speicherparameter der Gerinnestrecke
Klima (Jahresniederschlag via Landschaftsentwicklung)	Abflussbeiwert. Anmerkung: Das Klima sollte wirklich ähnlich sein

In diesem Zusammenhang werden die Begehungen und eine Auswahl von Fotos als Belege für solcherart zu analysierende Prozesse und Gebietsformen in einem Gebiet abgestimmt.



Abb. 4.24 Sichtbar unterschiedliche Gebietsformen in zwei benachbarten Einzugsgebieten, welche unterschiedliche Abflussverhältnisse widerspiegeln, wodurch eine Übertragung von Parametern trotz geografischer Nähe nicht zu empfehlen ist (links: Ötscherbach, rechts: Erlaufgebiet, Niederösterreich) (Fotos: Gutknecht)



Abb. 4.25 Sichtbar unterschiedliche Formen des Boden-Geologie-Komplexes zur Abschätzung von Ähnlichkeiten und Unterschieden von Abflussprozessen: (a) Almboden auf Kristallin mit gut erkennbarer Humusauflage (Koralpe, Steiermark/Kärnten), (b) Felswand (Karbonat) mit sehr geringer Bodenauflage (Tschepaschlucht/Karawanken, Kärnten), (c) Karbonatschutt (in verkarstetem Gebiet) ohne signifikante Bodenauflage (Semmering, Niederösterreich) (Fotos: Reszler)

Ein zusätzlicher Indikator für die Abflussbereitschaft in einem Gebiet ist die Vegetation. Sie beeinflusst Verdunstung, Verluste, Rückhalt, Oberflächenrauheit und weist oft auf das Auftreten von Oberflächenabfluss hin (z. B. Markart und Kohl 2004). Eine wichtige Eigenschaft stellt auch die Höhenlage dar, vor allem in Bezug zur klimatischen Situation. Bei der Übertragung der Parameter sind Unterschiede in der Niederschlagsverteilung sowie im Einfluss der Schneeschmelze (Abflussregime) zu berücksichtigen. In nassen und trockenen Gebieten können unterschiedliche Parameter an Gewicht gewinnen bzw. verlieren. Z. B. tritt in nassen Gebieten häufiger ein höheres Maß an Grundwasserneubildung und -abfluss auf, was zu einer Verschiebung hin zu langsameren Abflusskomponenten in der Abflussganglinie führen kann. Abb. 4.26 zeigt eine Auswertung der Kurvennummern des SCS-CN-Verfahrens aus Abflussmessungen. Es ist zu erkennen, dass die größten Kurvennummern (die größte Abflussbereitschaft) am niederschlagsreichen Alpennordrand auftreten. Bei Betrachtung kleinerer Gebiete ist die Situation naturgemäß räumlich differenzierter, die Karte zeigt jedoch, dass die SCS-CN-Werte nicht so sehr ein Abbild des Bodentyps und der Landnutzung sind, sondern ein Abbild der Jahreswasserbilanz der Einzugsgebiete.

In trockenen Gebieten kann wiederum die Bestimmung der aktuellen Verdunstung eine große Rolle spielen, die auch stark von der verfügbaren Wassermenge im Boden abhängt (aktuelle Verdunstung < potenzielle Verdunstung). Auch bezüglich der Extrapolierbarkeit von Hochwässern unterscheiden sich trockene und nasse Gebiete (Klima). Nichtlinearität und Schwellenwertprozesse sind in trockenen Gebieten meist ausgeprägter als in nassen, die entsprechend bei der räumlichen Übertragung von Parametern zu berücksichtigen sind (siehe z. B. Merz und Blöschl 2008ab).

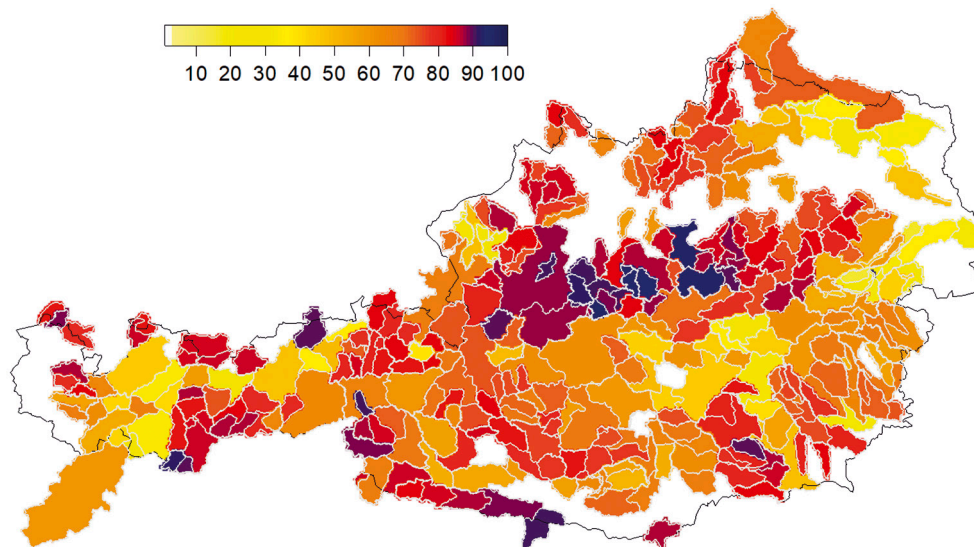


Abb. 4.26 SCS-CN-Werte rückgerechnet aus Abflussmessungen in Pegel Einzugsgebieten in Österreich (Merz et al. 2006)

BOX 4.12: Gebiete ohne Abflussdaten

Es wird empfohlen, falls vergleichbare Abflussdaten in der Umgebung verfügbar sind, eine Kalibrierung in diesen Gebieten vorzunehmen und die Parameter auf das Zielgebiet zu übertragen. Die vorhandene Ähnlichkeit in den Kenngrößen des Gebietes bestimmt die Möglichkeiten zur Übertragung der Parameter und ist deshalb zu dokumentieren. Die anhand der übertragenen Parameter gewonnenen Ergebnisse sollten gemäß Prozessverständnis und Zusatzinformationen auf Plausibilität überprüft werden.

Falls keine vergleichbaren Abflussdaten in der Umgebung verfügbar sind, werden die Parameter auf Basis einer A-priori-Einschätzung gewählt. Dem Prozessverständnis aus Feldbegehungen kommt dabei besondere Bedeutung zu.

4.6. Parameter für geänderte Bedingungen

4.6.1. Parameter für geänderte Landnutzungsbedingungen

Die Beurteilung des Einflusses geänderter Landnutzungsbedingungen auf den Abfluss ist methodisch mit der Abflussmodellierung für Gebiete ohne Abflussdaten verwandt, denn auch in diesem Fall können die Modellparameter (für die Änderungsszenarien) nicht aus einer Kalibrierung am gemessenen Abfluss gewonnen werden.

Bei der Analyse von Landnutzungsänderungen ist der Einsatz von raum-zeitlich hochauflösenden und prozessorientierten Modellen sinnvoll. Die räumliche Auflösung des Modells muss es erlauben, zumindest den Anteil der durch die Nutzungsänderung betroffenen Flächen zu berücksichtigen. Das Niederschlag-Abfluss-Modell muss in der Lage sein, die von der jeweiligen Nutzungsänderung betroffenen hydrologischen Prozesse zumindest näherungsweise abzubilden. Wurden A-priori-Parameter zur Landnutzung im Kalibrierungsprozess verändert, ist eine – weitere – Veränderung der Parameter zufolge Landnutzungsänderung schwierig belegbar bzw. argumentierbar. Eventuell können unterschiedliche Landnutzungen aus anderen Gebieten auf das betrachtete Gebiet übertragen werden, wenn dabei der Zustand in einem anderen Gebiet als maßgeblich für den geänderten, z. B. zukünftigen Zustand im betrachteten Gebiet betrachtet wird. Diese als „Trading Space For Time“-Konzept bezeichnete Methodik wird in Salazar et al. (2012) beschrieben und auch in Klimawandelstudien angewandt (siehe Kapitel 4.6.2.).

Landnutzungsänderungen bewirken erstens Änderungen in den Verdunstungseigenschaften in einem Gebiet. Zu ändernde Parameter sind beispielsweise die Werte für den LAI bzw. dessen Jahresgang. Zweitens sind vor allem bei Zunahme des Versiegelungsgrads geänderte Bedingungen bezüglich Oberflächenabfluss zu berücksichtigen, beschrieben beispielsweise durch die Parameter betreffend Speicherfähigkeit, Oberflächenabflussbeiwert und Rauigkeit.

Da es in Österreich in der jüngeren Vergangenheit zu keinen gravierenden großflächigen und überregionalen Landnutzungsänderungen gekommen ist, lassen sich signifikante Auswirkungen auf das Abflussregime meist nur in kleinen Einzugsgebieten feststellen. Landnutzungsänderungen spielen daher vor allem bei lokalen Starkregenbetrachtungen eine Rolle und stehen meist im Zusammenhang mit bestimmten landwirtschaftlichen Bewirtschaftungspraktiken bzw. der Zunahme versiegelter Flächen in Siedlungsbereichen. Für kleine Wildbachgebiete gibt es diesbezüglich zahlreiche Untersuchungen und Anleitungen im Umgang mit Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit (Landnutzung), wie die Geländeanleitung nach Markart et al. (2004) und die Anleitung zur Bewertung und Quantifizierung der Auswirkung von Versiegelungen auf den Oberflächenabfluss (Klebinder et al. 2010).

Abb. 4.27 illustriert Modellrechnungen zur Betrachtung der Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf extreme Hochwasserabflüsse in einem Wildbacheinzugsgebiet. Dabei wurden Verbesserungsmaßnahmen (Szenario 2a – Begrünung derzeit offener Einheiten durch Rasensaat und partielle Weidefreistellung und Szenario 2b – Aufforstung/Verbuschung der besiedelbaren Bereiche mit Latsche) sowie ein Szenario 3 extremer Zunahme an Erosionsflächen der aktuellen Situation gegenübergestellt. Die Rechnungen zeigen beim dritten Szenario eine große Zunahme des Abflusses. Ähnliche Untersuchungen wurden von Kohl et al. (2008) für das Hochwasserereignis 2005 im Paznauntal durchgeführt. Abb. 4.28 vergleicht die Abflussreaktion auf den Niederschlag des Ereignisses 2006 unter Annahme der Landnutzung im Jahr 1950 (Weide- und Almfläche) mit der Abflussreaktion unter Annahme der Landnutzung im Jahr 2005 (Wald). Deutlich ist die simulierte Retention am Anfang des Ereignisses zu erkennen. Ähnliche Analysen wurden von Salazar et al. (2012) für das Kampgebiet mit einem kontinuierlichen Modell durchgeführt.

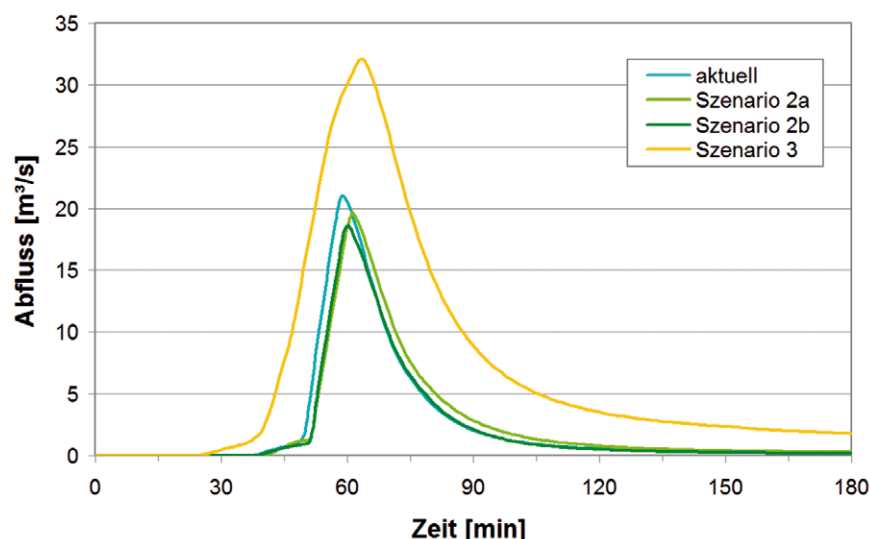


Abb. 4.27 Simulierte Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf extreme Hochwasserabflüsse im Höttinger Graben, Tirol (6,5 km²): Szenario 2a: Begrünung derzeit offener Einheiten durch Rasensaat und partielle Weidefreistellung, Szenario 2b: Aufforstung/Verbuschung der besiedelbaren Bereiche mit Latsche, Szenario 3: extreme Zunahme an Erosionsflächen (aus Kohl et al. 2011)

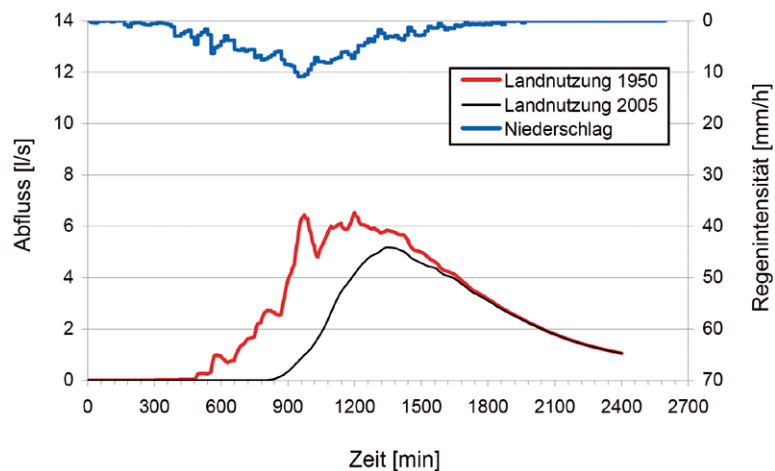
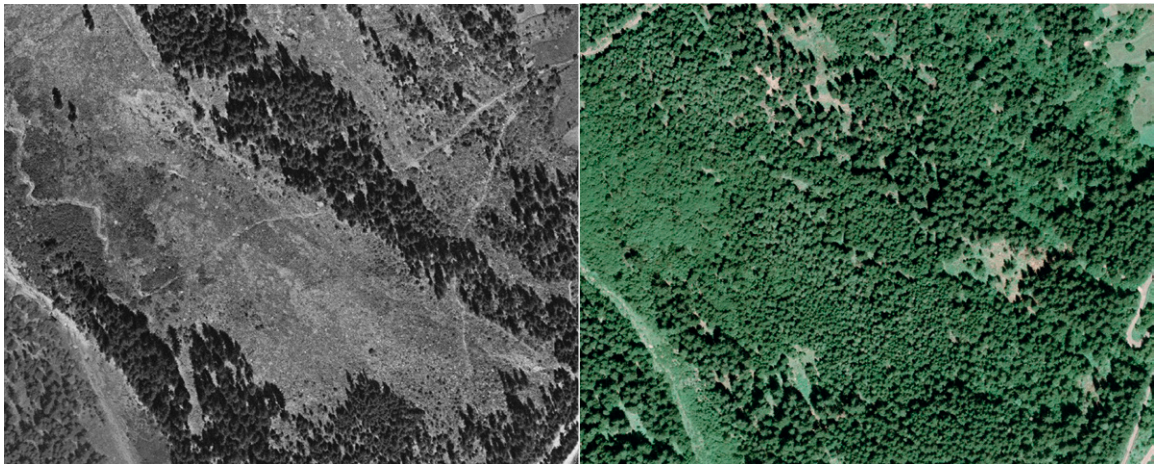


Abb. 4.28 Simulierter Einfluss der Veränderung der Landnutzung je Hektar auf das extreme Niederschlagsereignis August 2005 im Paznauntal, Tirol: Landnutzung 1950: Weide- und Almflächen, Landnutzung 2005: Wiederbewaldung (Kohl et al. 2009)

Auch bezüglich der hydrologischen Auswirkungen von Skigebieten (Pistenbau, künstliche Beschneigung) gibt es zahlreiche Untersuchungen. Der Einfluss auf das Abflussverhalten und den Wasserhaushalt ist auch hier meist nur kleinräumig. Untersuchungen wurden dabei auch hinsichtlich der Wirkung von mächtigen Kunstschneedecken bei Starkregenereignissen durchgeführt (Kohl et al. 2001). Dabei zeigte sich, dass je nach Dauer und Intensität der Niederschlagsereignisse sowohl eine Dämpfung als auch eine Verstärkung des Abflussprozesses erfolgen kann.

Extreme Abflussereignisse in großen Einzugsgebieten werden im Regelfall durch lang anhaltende Dauerregen ausgelöst. Dabei sind vor allem die Eigenschaften der Böden im Einzugsgebiet und weniger die Vegetation bzw. Landnutzung für das Retentionsvermögen von Bedeutung. Auch deshalb sind in großen Einzugsgebieten die Zusammenhänge zwischen Landnutzung und Abflussspitzen nicht sehr stark ausgeprägt. Nachweisbar sind hier am ehesten Auswirkungen auf die Wasserbilanz (z. B. verstärkte Verdunstung durch Zunahme bewaldeter Flächen).

Nachdem die Veränderungen und Auswirkungen sehr oft regionaltypisch sind, wird empfohlen, sich diesbezüglich mit den regional zuständigen Institutionen in Verbindung zu setzen (Wildbach- und Lawinenverbauung, Hydrographische Dienste).

BOX 4.13: Landnutzungsänderung

Zwei Möglichkeiten zur Bestimmung der Parameter zur Modellierung von Landnutzungsänderungen werden empfohlen: Erstens können A-priori-Parameter verwendet werden und die Veränderungen in den Parametern aus Prozessüberlegungen (größere Speicherkapazität, Verdunstung) abgeschätzt werden. Zweitens kann gemäß dem Konzept „Trading Space For Time“ eine Übertragung der – auch kalibrierten – Parameter aus Gebieten mit unterschiedlicher Landnutzungsverteilung erfolgen.

Auf die großen Unsicherheiten bei der Niederschlag-Abfluss-Modellierung von Landnutzungsänderungen ist Bedacht zu nehmen.

4.6.2. Parameter für geänderte Klimabedingungen

Bei der Analyse der Auswirkungen von historischen Klimaschwankungen bzw. möglichen zukünftigen Klimaänderungen sind im Regelfall Langzeitsimulationen über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten bzw. Jahrhunderten erforderlich (siehe Kapitel 2.2.6.). Methodisch ist dies wieder mit der Abflussmodellierung für Gebiete ohne Abflussdaten bzw. mit Landnutzungsänderungen verwandt, da sich die Modellparameter im Vergleich zur Kalibrierung ändern können.

Untersucht werden typischerweise mittlere und größere Einzugsgebiete. Eine sorgfältige Validierung des Modells ist daher von großer Wichtigkeit. Insbesondere bei der Simulation von Klimaänderungen ist es wichtig, möglichst lange Kalibrierungs- und Validierungszeiträume heranzuziehen und die Güte des Modells insbesondere bei extremen Klimaverhältnissen (z. B. 5 trockenste Jahre, 5 wärmste Jahre) zu prüfen. Dabei ist zu überprüfen, ob das Modell beobachtete, signifikante Trends nachvollziehen kann.

Aufgrund der großen Datenmengen (große Gebiete, Langzeitsimulationen) werden hinsichtlich der raum-zeitlichen Auflösung des Modells oft gewisse Vereinfachungen getroffen (halbverteilte, konzeptionelle Modelle). Da die meisten Klimaänderungsszenarien von einer starken zukünftigen Erwärmung ausgehen, ist aber darauf zu achten, dass die verwendeten hydrologischen Modelle insbesondere die Schnee- und Verdunstungsprozesse gut abbilden können.

Besondere Anforderungen ergeben sich auch im Umgang mit den meteorologischen Daten aus Klimaszenarien (Kapitel 2.2.6.). Eine Analyse von Extremniederschlägen unter zukünftigen Klimaverhältnissen und daraus resultierender Abflussspitzen ist aufgrund der bestehenden Fehler und Unsicherheiten in den globalen und regionalen Klimamodellen derzeit noch kaum sinnvoll möglich (Hall et al. 2014).

Bei der Untersuchung der hydrologischen Auswirkungen von Klimaänderungen wird meist postuliert, dass sich klimabedingt nur die Randbedingungen, nicht aber die Eigenschaften des Systems verändern, was nicht unbedingt zutreffen muss. Es muss davon ausgegangen werden, dass aufgrund der Änderungen im System die Modellparameter nicht konstant (stationär) sind, sondern zeitlichen Veränderungen unterliegen. Zu beachten sind auch mögliche Feedback-Mechanismen des Klimas auf die Vegetation bzw. Landnutzung. Durch Veränderungen im Klima kann es zu einer Veränderung der Vegetationsperiode (Verlängerung durch wärmeres Klima, Veränderung der Wasseraufnahme der Pflanzen), aber auch zu einer Veränderung von landwirtschaftlichen Anbauformen kommen. Dies kann die Verdunstung und Bodenfeuchte in einem Gebiet stark beeinflussen. Maßgeblich zu verändernde Parameter sind in diesem Fall z. B. der Crop-Faktor zur Bestimmung der potenziellen Vegetationsverdunstung oder der LAI, meist durch eine Verschiebung des Jahresgangs. Zusätzlich sind auch Rückkopplungen des Klimas auf die Speicherungs- und Infiltrationseigenschaften von Böden möglich, diese sind jedoch schwierig zu bewerten. Bei Studien im Hochgebirge kann eine Veränderung der Albedo aufgrund der Änderung der Gletscherfläche auftreten. Die Parameter in Abb. 4.29 beispielsweise wurden aus der Kalibrierung in verschiedenen Zeiträumen gewonnen. Sie weisen

einen Trend über die Zeit auf. Die Abnahme des Schneekorrekturfaktors (SCF) ist auf die Abnahme des Schneeanteils am Niederschlag zurückzuführen. Die Zunahme des Bodenkapazitätsparameters (FC) ist auf zunehmend trockenere Böden zurückzuführen, die mehr Wasser speichern können. Derartige Änderungen von Parametern sind zu berücksichtigen.

In der Studie „Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft“ der ZAMG und TU Wien für Bund und Länder (ZAMG/TU-Wien Studie 2011; Blöschl et al. 2011) wurde für zahlreiche Einzugsgebiete eine Niederschlag-Abfluss-Modellierung für veränderte Klimabedingungen mittels des Delta-Change-Ansatzes (siehe Kap. 2.2.6.) durchgeführt. Abb. 4.30 zeigt als Beispiel, wie sich der mittlere monatliche Abfluss verschieben könnte. Solche Berechnungen hängen aber nicht nur von der geeigneten Wahl der Parameter des Niederschlag-Abfluss-Modells, sondern auch von den meteorologischen Eingangsdaten für die Szenarien ab, die große Unsicherheiten aufweisen. Dementsprechend sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren.

Qualitative Auswertungen des Einflusses geänderter Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt können auch dadurch erfolgen, dass Regionen in die Auswertung einbezogen werden, in welchen die klimatischen Bedingungen ähnlich sind wie jene, die in den betrachteten Gebieten durch die Klimaänderung in Zukunft zu erwarten sind („Trading Space for Time“-Konzept). Das Modell wird dabei in den hinzugezogenen Gebieten angewendet und kalibriert. Aus den Unterschieden in den Simulationen können Rückschlüsse auf mögliche klimabedingte Veränderungen im betrachteten Gebiet gezogen werden. Anhand der Ähnlichkeiten in den Gebietseigenschaften werden die Übertragungen begründet und die Ergebnisse interpretiert. Auch diese Methode ist in der ZAMG/TU-Wien Studie (2011) dargestellt.

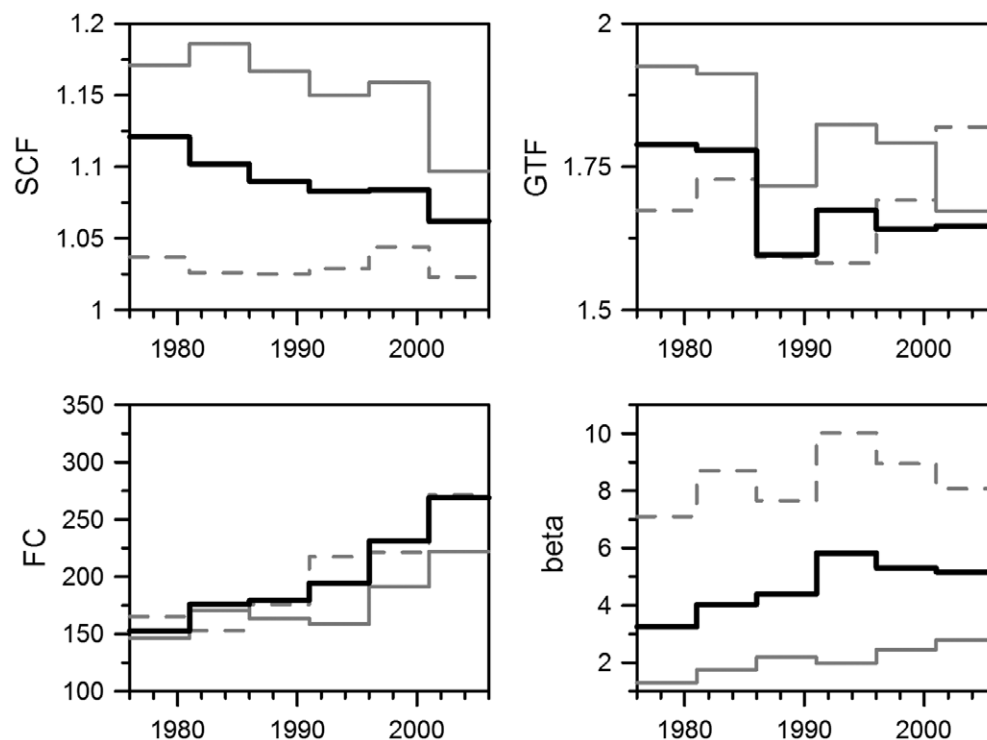


Abb. 4.29 Parameter-Instationarität am Beispiel der Parameter des HBV-Modells für jeweils 5 Jahre Kalibrierungsperiode gemittelt für 273 österreichische Einzugsgebiete (schwarze Linie: alle Gebiete, graue Linie: feuchte Gebiete, graue strichlierte Linie: trockene Gebiete. Trockene Gebiete sind solche mit $PET/P < 0,35$. Feuchte Gebiete sind solche mit $PET/P > 0,60$, wobei PET die potenzielle Verdunstung und P der mittlere Jahresniederschlag ist). FC ist die maximale Speicherkapazität, SCF der Schneekorrekturfaktor, GTF der Grad-Tag-Faktor und β der Nichtlinearitätsparameter der Abflussbildung (Merz et al. 2011)

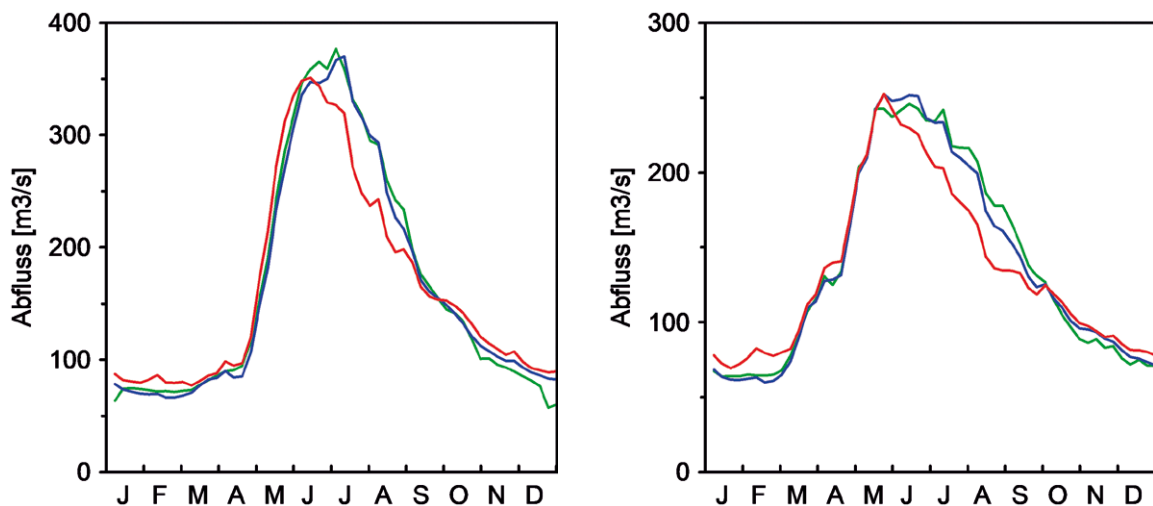


Abb. 4.30 Verschiebung der mittleren monatlichen Abflüsse für den Zeitraum 2021 – 2050 (Szenario: rot) im Vergleich zum Zeitraum 1976 – 2006 (simuliert: blau, gemessen: grün): links: Innsbruck/Inn (5792 km²), rechts: Golling/Salzach (3556 km²) (ZAMG/TU-Wien Studie 2011)

BOX 4.14: Klimaänderung

Es wird empfohlen, bei der Untersuchung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt darauf zu achten, dass die Modellparameter zeitlichen Veränderungen unterliegen können. Mögliche Feedback-Mechanismen des Klimas auf die Vegetation sind bei der Parameterwahl zu bedenken und die getroffenen Annahmen zu begründen. Generell wird dies durch die Verwendung von physikalisch basierten Ansätzen erleichtert. Bei Kalibrierung von Gebieten in unterschiedlichen klimatischen Zonen können auch „Trading Space For Time“-Methoden angewendet werden, wobei die Übertragung ebenso zu begründen ist.

Auf die großen Unsicherheiten bei der Niederschlag-Abfluss-Modellierung für geänderte Klimabedingungen ist Bedacht zu nehmen.

5. Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung

5.1. Modellvalidierung an Abflussdaten

5.1.1. Generelle Vorgangsweise Validierung/Plausibilisierung

Das Ziel der Validierung besteht darin sicherzustellen, dass das Modell nicht nur die Abflussdynamik eines Kalibrierdatensatzes wiedergeben kann, sondern auch Situationen, die sich davon unterscheiden. Die Validierung der Modellparameter und der verwendeten Modellstruktur ist deshalb von höchster Wichtigkeit, um die Prognosefähigkeit eines Modells zu belegen. Zur Validierung der Parameter ist ein vom Kalibrierungszeitraum unabhängiger Datensatz heranzuziehen (Split-Sample-Test). Neben dem unterschiedlichen Zeitraum ist darauf zu achten, dass – wenn möglich – auch Situationen (Perioden und Ereignisse) inkludiert sind, die sich dem Charakter nach von denen im Kalibrierungszeitraum unterscheiden. Unterschiedliche Situationen für Hochwässer sind z. B. kleine und große bis extreme Ereignisse, Ereignisse mit starken/schwachen Intensitäten mit/ohne Vorregen, Regen auf Schnee, konvektive/synoptische Ereignisse oder Abflussbildung nach langer Trockenphase. Unterschiedliche Situationen für die Wasserbilanz sind z. B. hydrologische Wasserverfügbarkeit (Bodenfeuchteverhältnisse) in der Vegetationsphase, Phasen von starker Grundwasserneubildung bei außergewöhnlicher Schneelage oder längerfristigen Regenperioden, Auslauf in Trockenphasen. Abweichungen zwischen Abflusssimulation und Beobachtung sind zu dokumentieren und interpretieren. Ergänzend dazu sollte das Niederschlag-Abfluss-Modell auch mittels anderer hydrologischer Informationen und hydrologischer Argumentation plausibilisiert werden. Es wird empfohlen, zur Validierung eine ähnliche Strategie anzuwenden durch Heranziehen von Zusatzinformationen wie bei der Kalibrierung. Teilergebnisse und Zustandsgrößen und bei flächendetaillierten Modellen räumliche Muster sollten in ähnlicher Weise und unter Heranziehen von verschiedenen Daten und Informationen interpretiert werden wie im Kalibrierungszeitraum.

Wenn in einem Gebiet keine Abflussdaten vorliegen, ist das Niederschlag-Abfluss-Modell ebenfalls zu testen. Dies kann durch Vergleich mit Abflussdaten in (hydrologisch ähnlichen) Nachbargebieten erfolgen und/oder durch eine sorgfältige Plausibilisierung mittels anderer hydrologischer Informationen. Damit wird beschrieben, ob das Modell hinsichtlich der Modellvorstellung und der Experteneinschätzung des Hydrologen entsprechend reagiert (= indirekte Validierung). Die Plausibilität der Ergebnisse im Zusammenhang zur Vorstellung über die in einem Gebiet ablaufenden Prozesse ist ausreichend zu dokumentieren.

Wenn die Validierung zufriedenstellende Ergebnisse in Hinblick auf die Aufgabenstellung zeigt, ist das Modell für die Anwendung einsatzbereit. Ist dies nicht der Fall, ist die Analyse zu erweitern (siehe Box 5.3).

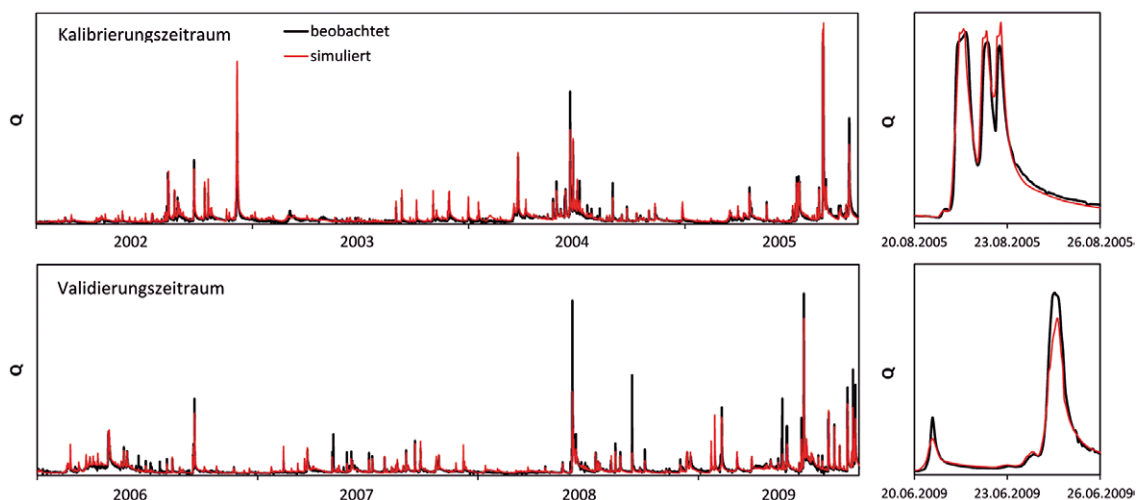


Abb. 5.1 Beispiel einer Kalibrierung und Validierung in unterschiedlichen Zeiträumen: Gleinstätten, Sulm, Steiermark, Fläche 265,3 km²

BOX 5.1: Generelle Vorgangsweise Validierung/Plausibilisierung

Die Validierung muss, wenn möglich, anhand von Abflussdaten eines von der Kalibrierung unabhängigen Datenzeitraums durchgeführt werden (**Split Sample**). Um die Extrapolationsfähigkeit des Modells zu testen, sollten auch Perioden und Ereignisse inkludiert werden, die sich dem Charakter nach von denen im Kalibrierungszeitraum unterscheiden. Ergänzend dazu ist eine Plausibilisierung des Modells anhand anderer hydrologischer Informationen durchzuführen. Wenn die Validierung zufriedenstellende Ergebnisse in Hinblick auf die Aufgabenstellung zeigt, ist das Modell für die Anwendung einsatzbereit. Ist dies nicht der Fall, ist die Analyse zu erweitern (siehe Box 5.3).

5.1.2. Schritte der Validierung

Generelle Schritte zur Validierung bzw. Plausibilisierung sind:

- (a) *Validierung anhand von Abflussdaten im Gebiet:* Die Validierung soll testen, ob die Abflussdaten und Modellergebnisse bezüglich der längerfristigen Wasserbilanz, der Saisonalität und der Dynamik von Einzelereignissen übereinstimmen, insbesondere Anstiegszeit, Scheitel und Auslauflinie (Ereignismodelle, kontinuierliche Modelle). Betreffend die längerfristige Wasserbilanz sollte überprüft werden, ob die aus Niederschlags- minus Abflusshöhe abgeschätzten Verdunstungshöhen für ein Gebiet in der betrachteten Region plausibel sind. Hierzu können die im Hydrologischen Atlas angegebene Gebietsverdunstung aus der Wasserbilanz (HAÖ 2005) sowie Angaben nach Kapitel 2.2.2., 2.2.5. und 2.4.3. herangezogen werden. Bei kontinuierlichen Niederschlag-Abfluss-Modellen wird auf diese Art der verwendete Verdunstungsansatz mit überprüft. Der Anfang und das Ende des Bilanzierungszeitraums sollte ähnliche Werte der Speicherung aufweisen (z. B. kein Schnee, wenig Wasser im Bodenspeicher), um den Bilanzfehler zu minimieren. Betreffend den saisonalen Abfluss ist auf die Einflussgrößen Verdunstung und Grundwasserspeicherung abzielen. Zur Validierung gehört auch eine Abschätzung der Wirkung von Beeinflussungen des Abflussregimes durch Zu- und Ableitungen und durch den Betrieb von Kraftwerken. Betreffend die Abflussdynamik von Einzelereignissen wird empfohlen, zuerst zu prüfen, ob die Auslauflinien der stark verzögerten Abflussanteile vom Modell richtig wiedergegeben werden. Als nächstes werden die Auslauflinien im mittleren Bereich und zuletzt die Hochwasser-Auslauflinien überprüft. Eine weitere Prüfung betrifft das Anspringen der Hochwasserganglinien: Zeigen beobachtete bzw. simulierte Ganglinien den Anstieg einer Hochwasserwelle synchron an, oder steigt die simulierte Ganglinie regelmäßig zu früh oder zu spät an? Die wichtigste Darstellung der Simulationsgüte, sowohl im Kalibrierungs- als auch im Validierungszeitraum, ist der Vergleich von simulierten und beobachteten Ganglinien für repräsentative Zeiträume (Abb. 5.1). Der Betrachtungsbereich und die Skalierung der Ganglinien sind in den Darstellungen gemäß der Fragestellung sorgfältig zu wählen. Zudem sollten die erreichten Gütemaße (Zielfunktion) der Abflusssimulation angegeben werden, sowohl im Kalibrierungs- als auch im Validierungszeitraum. Die Gesamtsituation kann beispielsweise anhand von „Scatter-Plots“ beurteilt werden, in welchen die simulierten und beobachteten Abflüsse, oder auch Abflussscheitel, auf orthogonalen Achsen aufgetragen werden, kumulative Differenzlinien des Abflusses oder einer Gegenüberstellung der statistischen Eigenschaften von Simulation und Beobachtung, z. B. anhand der Häufigkeitsverteilung oder kumulativer Häufigkeitsverteilung. Für eine detaillierte Analyse der Fehlerstruktur, wie es häufig bei Hochwasserprognosen notwendig ist, werden auch die Fehlerganglinien statistisch ausgewertet.
- (b) *Analyse von Perioden, in denen Abweichungen festzustellen sind und deren Diskussion und Erklärung bzw. Dokumentation.* Zur Interpretation der Abweichung zwischen beobachteten und simulierten Abflüssen wird empfohlen, Metadaten (also Daten über die Datenerhebung) heranzuziehen. Darin sind Wartungen, Geräteausfälle, Instandsetzungen, besondere Vorkommnisse, Verhältnisse und Beobachtungen (z. B. die Messung beeinflussende Bauarbeiten etc.) enthalten. Zudem sind andere Einflüsse auf die Abflussbildung

und die Abflusskonzentration auszuwerten, die den hydrologischen Charakter des Validierungszeitraumes beschreiben (z. B. Regen auf Schnee), um Erklärungsmuster für Abweichungen zu erhalten).

- (c) *Plausibilitätskontrolle*: Unter Einbeziehung von „soft data“ und hydrologischer Argumentation erfolgt eine gleichzeitige Analyse von verschiedenen Größen: Abfluss, Niederschlag, Schnee, Temperatur und Bodenfeuchte. Teilergebnisse und Zustandsgrößen und bei flächendetaillierten Modellen räumliche Muster sollten in ähnlicher Weise und unter Heranziehen von verschiedenen Daten und Informationen interpretiert werden wie im Kalibrierungszeitraum. Geprüft wird, ob durch das Modell eine zuverlässige Nachbildung einer Bandbreite von unterschiedlichen Situationen möglich ist: z. B. Schneeschmelze, kurze Ereignisse, lange Ereignisse, Trockenwetterauslauf (Niveau des Basisabflusses – Langzeitverhalten). Der Plausibilitätskontrolle kommt in Gebieten ohne Abflussdaten eine zentrale Rolle zu. In Kapitel 5.2. wird im Detail auf die Vorgangsweise zur Plausibilitätskontrolle in Wildbachgebieten, ländlichen und städtischen Einzugsgebieten eingegangen.

Abb. 5.2 zeigt ein Beispiel zur Durchführung der drei Schritte der Validierung. Es zeigt Simulationsergebnisse anhand eines kontinuierlichen Wasserbilanzmodells, auch abgestimmt auf Hochwasser (Modell KAMPUS, aus Reszler et al. 2008b), für ein Jahr (saisonale Skala). Dieses Jahr beinhaltet mehrere verschieden große Ereignisse. Das oberste Diagramm (Abb. 5.2a) zeigt die beobachteten Gebietsniederschläge, gewonnen aus interpolierten Stationsdaten, sowie Gebietsmittel simulierter Schneewasserwerte (SWE) und beobachtete Schneehöhen an charakteristischen Stationen im Gebiet. Abb. 5.2b zeigt den Verlauf der simulierten relativen Bodenfeuchte (Sb/FC) und der berechneten Summenlinie der Verdunstung (ET), jeweils Gebietsmittel. In Abb. 5.2c sind die Simulationen der mittleren Füllstände der einzelnen Bodenspeicher aufgetragen: $S1$ ist der oberste Bodenspeicher, $S2$ ist der tiefgründige Bodenspeicher und $S3$ der Grundwasserspeicher (Modellstruktur siehe Reszler et al. 2006ab). Im untersten Diagramm (Abb. 5.2d) sind schließlich die simulierten und beobachteten Pegelabflüsse gegenübergestellt. Die zeitgleiche Darstellung der verschiedenen Größen erleichtert die Argumentation.

Gemäß den drei Validierungsschritten lassen sich die folgenden Argumentationen aufstellen:

Ad (a): Validierung anhand von Abflussdaten im Gebiet: Insgesamt entspricht die simulierte Abflussganglinie auf der saisonalen Skala (d) sehr gut der Beobachtung in Hinblick auf Niveau und Dynamik. Zur ereignisbasierten Bewertung ist als Beispiel der August dieses Jahres in Abb. 5.3 herausgegriffen. In dem dargestellten Zeitraum trat ein Doppelereignis mit zwei ähnlich hohen Spitzen innerhalb einer Woche auf, welche sehr gut getroffen werden. Die erreichten Gütemaße (Zielfunktion) der Abflusssimulation im Validierungszeitraum bei verschiedenen großen Ereignissen und auf der saisonalen Skala (Wasserbilanz) ist sehr gut (z. B. $NSE = 0.81$ beim Ereignis im März (Schneesmelze), $NSE = 0.96$ beim Ereignis im Juli und $NSE = 0.95$ beim Doppelereignis im August). Über das gesamte Jahr ist der $NSE = 0.91$.

Ad (b): Die Abweichungen im Februar und März, als die Schneeschmelze eine große Rolle spielte, sind auf Unsicherheiten im Schneeschmelzmodell bzw. in den Schneeschmelzparametern, aber auch auf mögliche Fehler in den Eingangsdaten (Unterschätzung des festen Niederschlags an den Messstationen durch Windeinflüsse) zurückzuführen. Die Überschätzung der Abflüsse im Mai liegt an den Unsicherheiten in der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Niederschläge bei den hier aufgetretenen kleinräumigen konvektiven Gewittern (Interpolation). Beim Doppelereignis im August (Abb. 5.3) wird die erste Spitze leicht unterschätzt, was neben Unsicherheiten im Niederschlag auch an den Anfangsbedingungen liegen kann. Die Neigung der simulierten Auslauflinie des ersten Ereignisses zeigt geringfügige Abweichungen von der beobachteten Neigung, was auf Unsicherheiten in der Aufteilung unter den verschiedenen Abflusskomponenten in der Simulation hindeutet. Beim zweiten Ereignis wird der Anstieg leicht verzögert simuliert. Die Niederschlagsintensitäten (Abb. 5.3a) sind recht hoch, was auf eingelagerte konvektive Zellen hindeutet, bei welchen bezüglich räumlicher Verteilung

relativ hohe Unsicherheiten auftreten können. Der Analyse des Niederschlages kommt in diesem Fall eine besondere Bedeutung zu.

Ad (c): Für eine Plausibilitätskontrolle bzw. eine Kontrolle der Vorstellung über die in einem Gebiet ablaufenden Prozesse können aus der Abbildung folgende Schlüsse gezogen werden, welche durch die aus den Begehungen gewonnene Gebietskenntnis belegt werden: Der Beginn dieses Jahres zeichnete sich durch eine hohe Schneelage im Gebiet aus (Abb. 5.2a). Für das Gebiet wird in der Simulation sehr gute Übereinstimmung mit dem beobachteten Abfluss erzielt (Abb. 5.2d), sowohl in und nach der Zeit der Schneeschmelze, als auch in den Monaten danach. Grundsätzlich ist in den simulierten Größen der relativ nasse Charakter dieses Jahres sehr gut sichtbar. Auch die simulierten Modellzustandsgrößen zeigen einen plausiblen Verlauf. In Abb. 5.2b wird zunächst der Einfluss der Schneeschmelze auf die Bodenfeuchte und die geringe Verdunstung im Winter deutlich. Die simulierte Bodenfeuchte steigt infolge der Schneeschmelze auf einen Wert von ca. 80 %. Dieser hohe Wert hält bis in den April hinein an. Erst Ende April führt die größer werdende Verdunstung durch die stärkere Sonneneinstrahlung zu einer Reduktion der Bodenfeuchte. Die simulierte Bodenfeuchte kann hier als Indikator für den (mittleren) Bodenfeuchtezustand des Gebietes interpretiert werden. Der meist hohe Wert im Frühjahr ist konsistent mit den aus den Gebietsbegehungen gewonnenen Aufschlüssen von annähernd gesättigten Böden während und längere Zeit nach der Schneeschmelze (Abb. 5.2). Wie die Abflussdaten (Abb. 5.2d) zeigen, genügen schon geringe Niederschläge in dieser Zeit, um die Pegel ansteigen zu lassen. Dies wird anhand des Modells zutreffend beschrieben. Ebenso ist der Füllstand des tiefgründigen Speichers *S2* über das Frühjahr bis in den Sommer hinein hoch (Abb. 5.2c). Die hohen Werte deuten auf eine sehr stark ausgeprägte tiefgründige, langsame Abflusskomponente nach der Schneeschmelze hin. In vielen Gebieten in Österreich ist bei sehr nassen Bedingungen häufig eine Verschiebung zu langsameren Abflusskomponenten hin zu beobachten, was sich in relativ flachen Auslauflinien in dieser Zeit zeigt. Entsprechend dem Input (Regen + Schmelze) reagiert der obere Speicher *S1* plausibel. Er repräsentiert im Modell die raschere Abflusskomponente und reagiert stark auf die hohen Niederschlagsintensitäten im Mai, Juni und Juli sowie in gedämpfter Form auf die hohen Schmelzraten Ende März. Zwischen den Ereignissen geht der Füllstand immer wieder auf Null zurück. Der tiefste Grundwasserspeicher *S3* reagiert nur sehr schwach über das Jahr. Beim Doppelereignis im August (Abb. 5.3) zeigt sich das erwartete Verhalten der Zustandsgrößen. Die Bodenfeuchte ist zu Beginn aufgrund der starken Verdunstung im Sommer relativ niedrig. Es zeigt sich eine starke Aufsättigung, welche die Abflussbildung steuert (Abb. 5.3b und d). In dieser Phase lässt sich die Abflussbildung – Aufteilung des Niederschlages in Bodenspeicherung und Abfluss – gut überprüfen. Beim Vorniederschlag (14.8. und 15.8.) tritt nur eine sehr geringe Abflusserhöhung auf, was mit dem Modell entsprechend simuliert werden kann. Im Modell zeigt sich die Speicherung in der Erhöhung der Bodenfeuchte. Die hohe Speicherkapazität ist konsistent mit den im Gebiet gewonnenen Erkenntnissen über den sehr speicherfähigen Boden-Geologie-Komplex (Bodenbeispiel siehe Abb. 4.3a) und zusätzlich zerklüfteter Granituntergrund). Zwischen den Ereignissen geht die Bodenfeuchte wieder leicht zurück; der richtigen Abbildung der Bodenfeuchte (Verringerung durch Verdunstung oder Tiefenversickerung) kommt hier eine besondere Bedeutung zu, damit die Abflussbildung beim darauf folgenden Ereignis entsprechend simuliert werden kann (Abb. 5.2b und d). Beim zweiten Ereignis trat weniger Niederschlag auf, aber der Abflussscheitel ist ungefähr in der gleichen Größenordnung wie jener beim ersten Ereignis, was die Nichtlinearität in der Abflussbildung zeigt. Dies wird durch den großen Speicher des Boden-Geologie-Komplexes erklärt. Bei einer Gebietsbegehung nach einem längeren Ereignis wurde beobachtet, dass im Gebiet nach entsprechender Aufsättigung auch an bewaldeten Hängen Oberflächenabfluss auftritt (siehe Beispiel aus Abb. 4.4). Der stetige Anstieg des Speichers *S2* über beide Ereignisse zeigt die über einen längeren Zeitraum stetig wirkende Tiefenperkolation, welche bewirkt, dass die Basisabflüsse nach den beiden Ereignissen erhöht bleiben (gefüllte Bodenspeicher). Nach der Gebietskenntnis stellt dies bei lang anhaltenden Niederschlägen oder nach der Schneeschmelze einen signifikanten Prozess dar.

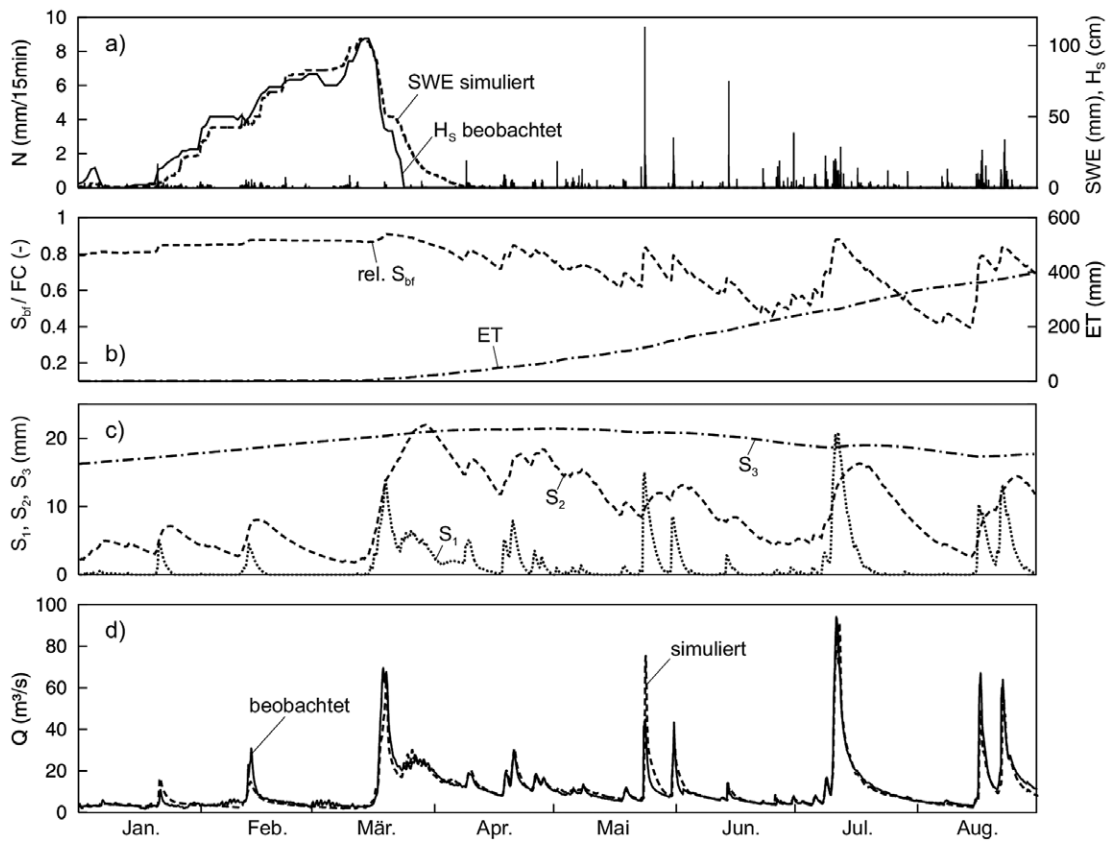


Abb. 5.2 Simulierte und beobachtete hydrologische Größen im Jahr 2006 (Modell KAMPUS, aus Reszler et al. 2008b): (a) Niederschlag, simulierter Schneewasserwert und beobachtete Schneehöhen, (b) simulierte Gebietsmittel der relativen Bodenfeuchte (S_{bf}/FC) und simulierte Summenlinie der Verdunstung (ET), (c) simulierte Gebietsmittel der Füllstände der Bodenspeicher (S_1 , S_2 , S_3), d) simulierter und beobachteter Abfluss für die Pegelstelle Zwettl, Kamp (Fläche 622 km²)

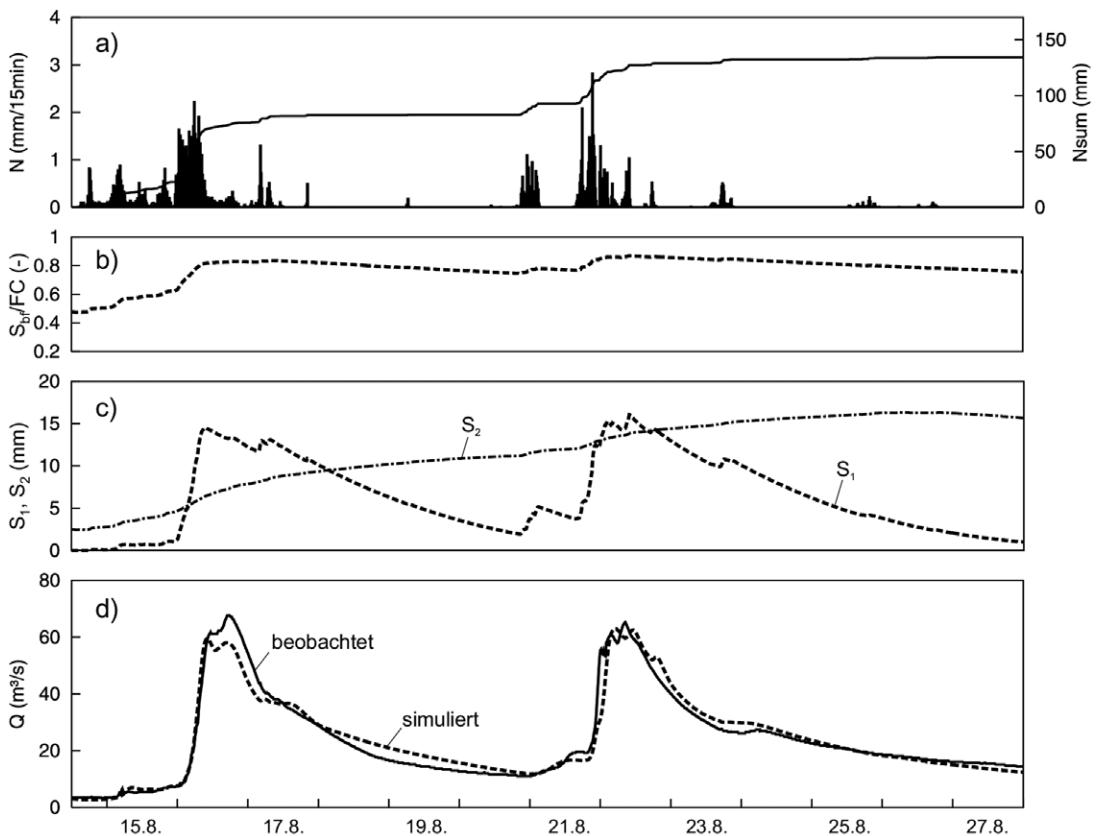


Abb. 5.3 Ereignis im August 2005, Zwettl, Kamp (Fläche 622 km²)

Box 5.2: Schritte der Validierung

Folgende Schritte der Modellvalidierung werden empfohlen:

- (a) Validierung anhand von Abflussdaten im Gebiet: Überprüfung, ob Abflussdaten und Modellergebnisse bezüglich der längerfristigen Wasserbilanz, der Saisonalität und der Dynamik von Einzelereignissen übereinstimmen, insbesondere Anstiegszeit, Scheitel, und Auslauflinie (Ereignismodelle, kontinuierliche Modelle). Die simulierten und beobachteten Ganglinien sind grafisch gegenüberzustellen. Zur Vergleichbarkeit ist es günstig, für die Validierung und Kalibrierung gleiche Gütemaße zu verwenden. Darstellungen sollen in repräsentativer Weise sowohl gut als auch schlecht modellierte Ganglinienabschnitte zeigen.
- (b) Analyse von Perioden, in denen Abweichungen zwischen simuliertem und beobachtetem Abfluss festzustellen sind, deren Diskussion und Dokumentation.
- (c) Plausibilitätskontrolle durch Einbeziehung von anderen hydrologischen Informationen, „soft data“ und hydrologischer Argumentation.

5.1.3. Umgang mit schlechten Validierungsergebnissen

Abweichungen zwischen der beobachteten und der simulierten Ganglinie sowie die Plausibilitätsprüfung geben Hinweise auf Fehlfunktionen des Modells. Typische Fehlfunktionen des Niederschlag-Abfluss-Modells sind wie folgt:

- Abflussscheitel werden systematisch unterschätzt; mittlere und untere Durchflussbereiche werden systematisch überschätzt; Wasserbilanz ist richtig: Es müssen jene Parameter des Modells geändert werden, die für die Aufteilung des abflusswirksamen Niederschlags in schnelle und langsame Abflussreaktion verantwortlich sind.
- Abflussscheitel werden systematisch überschätzt: Zu steile Auslauflinien entstehen, wenn die Zeitkonstanten bei Linearspeicher-Ansätzen zu klein sind bzw. die Rauigkeiten bei hydraulischen Ansätzen zu gering.
- Fehler bei kontinuierlichen Modellen treten in der Zeit um das Ende der Schneeschmelze auf; der simulierte Abfluss geht über einige Tage markant zurück und bleibt dann deutlich zu klein: Dieser Effekt ist meist auf die Niederschlagsdaten zurückzuführen. Werden generell die unkorrigierten Ombrometer- oder Ombrografendaten als Modellinput verwendet, so sind diese Werte um den bei Schneefall oft sehr großen Messfehler zu klein. Bei hohen Windgeschwindigkeiten während Schneefall kann der Fehler bis 200 % des Messwerts betragen (siehe Kapitel 2.2.2.). Im Laufe des Winters akkumulieren sich diese Fehler und bei der Schneeschmelze errechnet das Modell eine zu frühe Ausaperung des Einzugsgebietes, weil die vom Modell bilanzierte Schneedeckung schon aufgebraucht ist, während das Einzugsgebiet in Wirklichkeit noch in weiten Teilen verschneit ist.
- Neigung der Auslauflinie ist falsch: Die Speicherung wird nicht gut wiedergegeben, die Speicherparameter müssen geändert werden.

Abb. 4.15 und 4.16 zeigen typische Ganglinieneigenschaften zur Beurteilung der Modellierungsgüte für Ereignisse und die saisonale Skala.

Wenn die Abweichungen zwischen der beobachteten und der simulierten Ganglinie in Hinblick auf die Aufgabenstellung (Hochwasserscheitel, Ereignisfracht, langfristige Saisonalität, Wasserbilanz etc.) gering sind und das Modell als plausibel angesehen werden kann, ergibt die Validierung zufriedenstellende Ergebnisse. Das Modell ist für die Anwendung einsatzbereit.

Wenn die Abweichungen zwischen der beobachteten und der simulierten Ganglinie in Hinblick auf die Aufgabenstellung groß sind oder das Modell als nicht plausibel angesehen werden muss, ergibt die Validierung keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Dies kann verschiedene Ursachen haben. Zum einen kann sich die Datenqualität im Validierungszeitraum von der im Kalibrierungszeitraum unterscheiden. Falls die Daten fehlerhaft sind, sollten sie korrigiert wer-

den. Zudem ist es sinnvoll, zusätzliche Daten zu verwenden, falls verfügbar. Zur Interpretation der Abweichung zwischen beobachteten und simulierten Abflüssen sollen Metadaten (z. B. zu Wartung und Geräteausfällen) herangezogen werden. Zum anderen kann eine „Überanpassung“ (engl. „Overfitting“) an die Abflussdaten des Kalibrierungszeitraums vorliegen. Dies erkennt man daran, dass die Validierung wesentlich schlechtere Ergebnisse als die Kalibrierung liefert. Dies kann an einer Überparametrisierung, d. h. einer zu großen Anzahl an Modellparametern im Vergleich zu den verfügbaren Daten liegen (Kapitel 4.4.5.). In diesem Fall sollte die Anzahl der Kalibrierparameter reduziert werden, indem ein Teil der Parameter anhand anderer hydrologischer Informationen als der Abfluss gewählt wird (A-priori-Parameter), und die restlichen Parameter neu kalibriert werden. Schließlich könnte die Modellstruktur für die Beschreibung des Niederschlag-Abfluss-Prozesses im Validierungszeitraum nicht geeignet sein. Hinweise dafür gibt die Plausibilisierung auf Basis hydrologischer Argumentationen. Ist dies der Fall, sollte die Modellstruktur adaptiert werden (z. B. Verwendung einer zusätzlichen Abflusskomponente für den Makroporenabfluss, gesonderte Berücksichtigung von Regen-auf-Schnee-Ereignissen) bzw. ein anderes, geeigneteres Modell verwendet werden.

Wenn die Validierung nach diesen Schritten keine hinreichend guten Ergebnisse in Hinblick auf die Aufgabenstellung bringt, können die Modellparameter mittels der Validierungsdaten sorgfältig nachjustiert werden. Das kann besonders dann sinnvoll sein, wenn die Validierungsdaten der Prognosesituation ähnlicher sind als die Kalibrierungsdaten. Das ist z. B. der Fall, wenn bei einem Ereignismodell für die Hochwassersimulation das größte Ereignis für die Validierung aufgehoben wurde, und mit diesem die Modellparameter nachjustiert werden. Eine derartige Nachjustierung sollte die Modellparameter nur gering ändern, da hier abermals die Gefahr des Overfittings besteht. Außerdem besteht bei der Nachjustierung der Modellparameter mittels der Validierungsdaten eine größere Restunsicherheit bei der Lösung der Aufgabenstellung, als dies der Fall ist, wenn die Validierungsdaten ausschließlich für die Validierung verwendet werden und letztere gute Ergebnisse zeigt. Diese größere Restunsicherheit ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen und zu kommunizieren.

Box 5.3: Umgang mit schlechten Validierungsergebnissen

Gibt die Validierung wesentlich schlechtere Ergebnisse als die Kalibrierung sollten:

- (i) die Daten im Validierungszeitraum auf Konsistenz mit dem Kalibrierungszeitraum geprüft werden, und wenn fehlerhaft korrigiert werden;
- (ii) Modellparameter in Hinblick auf eine mögliche Überparametrisierung analysiert werden. Ist dies der Fall, sollte die Anzahl der Kalibrierparameter reduziert werden, indem ein Teil der Parameter anhand anderer hydrologischer Informationen als der Abfluss gewählt wird, und die restlichen Parameter neu kalibriert werden.
- (iii) Modellstruktur: Falls es Hinweise auf strukturelle Fehlfunktionen des Modells gibt, ist eine Adaptierung des Modells bzw. Verwendung eines anderen Modells zu empfehlen.

Wenn die Validierung nach diesen Schritten keine hinreichend guten Ergebnisse in Hinblick auf die Aufgabenstellung bringt, können die Modellparameter mittels der Validierungsdaten sorgfältig nachjustiert werden. Allerdings verbleibt dadurch eine größere Restunsicherheit bei der Lösung der Aufgabenstellung, die bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen und zu kommunizieren ist.

5.2. Plausibilisierung von Modellen in unbeobachteten Einzugsgebieten

5.2.1. Ländliche Einzugsgebiete

Liegen keine Messungen des Abflusses vor (unbeobachtete Einzugsgebiete), sind Alternativen zum Test des Modells erforderlich, die als Plausibilisierung bezeichnet werden. Diese ist im engen Zusammenhang mit der Bestimmung der Parameter in unbeobachteten Gebieten (Kapitel 4.5.) und generell mit der Bestimmung von A-priori-Parametern (Kapitel 4.3.) zu

sehen. Die Vorgangsweise bei der Berücksichtigung möglichst umfangreicher, relevanter Informationen ist ähnlich, doch sollten in diesem Schritt nur solche Informationen verwendet werden, die nicht ursprünglich bei der Parameterbestimmung verwendet wurden. In diesem Sinn ist die Plausibilisierung auch als Split-Sample-Test (und damit als indirekte Validierung) zu sehen.

Die für die Plausibilisierung des Modells relevanten Informationen unterscheiden sich je nach Naturraum. Für ländliche Einzugsgebiete geben Kapitel 5.1.2. sowie 4.3. und 4.5. einige Beispiele. Für Wildbacheinzugsgebiete und für städtische Einzugsgebiete werden im Folgenden einige Beispiele dargestellt.

5.2.2. Wildbacheinzugsgebiete

Wildbäche sind durch rasch ansteigende Abflüsse und durch den Transport von Feststoffen (Geschiebe) charakterisiert. Je schneller und je mehr Feststoffe infolge eines Niederschlagsereignisses mobilisiert werden, desto mehr weicht das Abflussgeschehen von den bekannten hydrologischen Ansätzen ab. Deshalb ist in Wildbacheinzugsgebieten primär der anzusetzende Verlagerungsprozess (siehe Österreichisches Normungsinstitut 2009) zu ermitteln. An Referenzprofilen, die im Rahmen der Ereignisdokumentation (Hübl 2009) erhoben wurden und die Anschlagmarken von Abflüssen zeigen, können die Wassertiefen des Scheitelabflusses von berechneten Abflüssen mit den dokumentierten verglichen werden. Ein Beispiel für eine derartige Plausibilisierung zeigt Abb. 5.4. Am Nachmittag des 7.7.2011 löste ein schweres Gewitter nordöstlich von Oberwölz (Steiermark) verheerende Abflüsse aus. Am Schöttlbach (Einzugsgebietsfläche 71 km²) wurde bei der Gemeindegewegbrücke (hm 14,7) anhand von Foto- und Videomaterial mithilfe der zeitlichen Information von digitalen Bildaufnahmen der Verlauf des Abflusses rekonstruiert. Die hydraulische Berechnung der Abflussspitze bei Profilstelle hm 14,7 ergibt einen maximalen Abfluss von 92,4 m³/s. Bei der Rückrechnung wurde mit verschiedenen Fließgeschwindigkeiten und Abflussquerschnitten gerechnet, da nicht genau bekannt ist, wie viel Sediment schon vor dem Ereignis im Gerinnebett abgelagert gewesen war. Die zeitliche Auswertung hat zudem ergeben, dass die Abflussspitze im Schöttlbach um ca. 16:30 MEZ aufgetreten ist. Diese Information wurde zur Plausibilisierung des Niederschlag-Abfluss-Modells NASIM verwendet (Abb. 5.4).

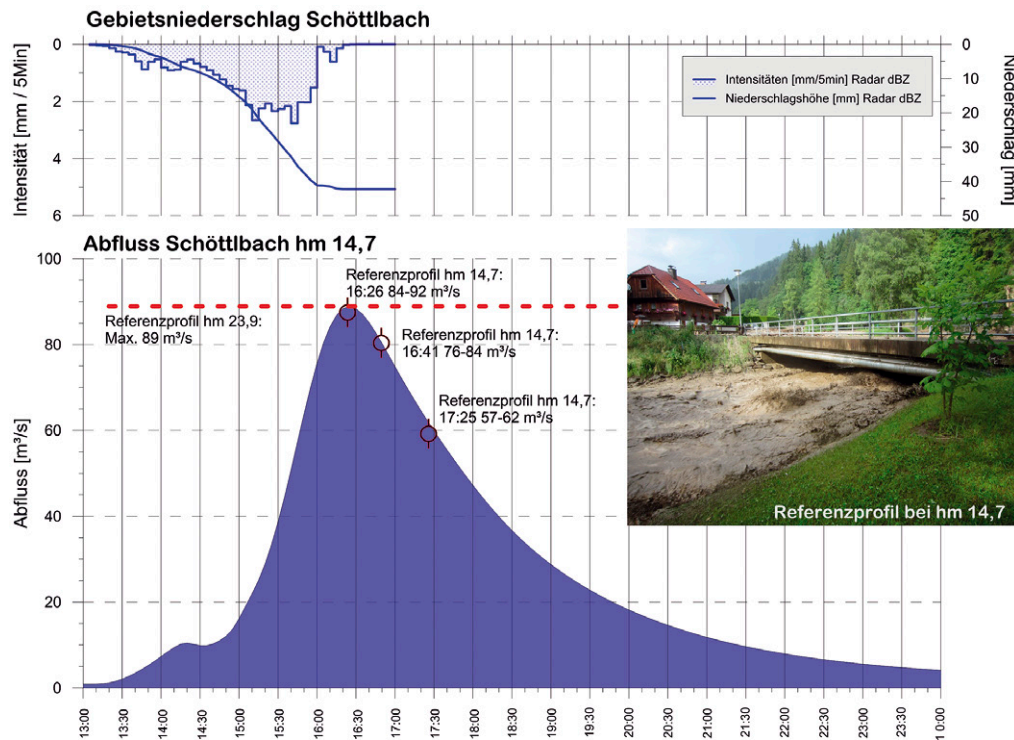


Abb. 5.4 Ereignis 7.7.2011, Schöttlbach – Oberwölz, Steiermark. Blau: berechnet, Punkte: Rückrechnung des Abflusses aus dem Foto, das um 16:41 aufgenommen wurde (Hübl et al. 2012)

Falls keine Messdaten des Abflusses vorliegen, ist man auf indirekte Datenquellen angewiesen, um Ergebnisse von Ereignismodellen zu überprüfen. Dies geschieht z. B. mithilfe der Prozesskenntnis aus Begehungen des Gebiets, Aussagen bzw. Hinweisen Ortsansässiger, der Auswertung von Chroniken und unter Beachtung des im Einzugsgebiet anzutreffenden geomorphologischen Formenschatzes, der sogenannten „stummen Zeugen“ (Aulitzky 1992), und der Übertragung aus Nachbargebieten. Geben Chroniken vor allem Aufschluss über die Frequenz von Schadereignissen, so können vorliegende Ereignisbeschreibungen aber auch quantitative und qualitative Aussagen über die Größenordnung eines Ereignisses enthalten, z. B. Angaben über Abflusstiefen bzw. Überschwemmungs- oder Übermurrungsflächen (Hübl et al. 2002). Diese Aussagen sind zu interpretieren und vor Ort zu verifizieren. Zu berücksichtigen ist jedenfalls, dass die gefundenen Aussagen nur für den räumlichen Zustand zum Zeitpunkt der Meldung gelten können und zumeist eine persönliche Note des Chronisten beinhalten. Weitere Informationen sind geomorphologische Zeiger, d. h. Indikatoren unterschiedlich großer Ereignisse aus der Vergangenheit (Hübl et al. 2003). Landschaftsprägende Abflüsse kann man in Tallandschaften zumeist an Erosionskehlen, also vom Gewässer unterschrittenen Einhängen oder Schwemmkegeln erkennen. Ebenso können ausgewaschene Wurzeln im Nahbereich von Gewässern auf größere Abflüsse hinweisen. Abgeschliffene Felsen, erodierter Bewuchs an Gerinneinhängen (z. B. Moosschicht) bzw. Bewuchs im Gerinne kann bezüglich Frequenz (Verteilung und Alter der Vegetation) und Größenordnung der Abflüsse interpretiert werden. Schwimmstoffe, vor allem aus Plastik, stellen gute Indikatoren für Wassertiefen dar, wenn sie in der Vegetation (v. a. im Astwerk) hängenbleiben. Dendrogeomorphologische Methoden, die auf der Analyse von Schäden an Holzgewächsen basieren, liefern ebenfalls Hinweise auf Frequenz und Magnitude von Abflüssen.

Insgesamt sollte die Plausibilitätsprüfung nicht nur auf einen Indikator beschränkt bleiben, sondern es sollte durch die Analyse verschiedener Datenquellen ein „Indikatorpuzzle“ zusammengefügt werden, das eine nachvollziehbare Aussage ermöglicht. Ein Beispiel für eine derartige Plausibilisierung zeigt Abb. 5.5 (Chronik, Nachrechnung dokumentierter Ereignisse, „stumme Zeugen“, Nachrechnung beobachteter Anschlaglinien, Vergleich mit empirischen Faustformeln). Es handelt sich um den Höttinger Bach (Innsbruck, Tirol, Einzugsgebietsfläche 6,7 km²; Kammerlander 2011). Unter Verwendung eines Niederschlags der Jährlichkeit 150 Jahre wurde mit dem Modell ZEMOKOST (Kohl 2011) eine Abflussspitze von 21 m³/s errechnet. Die kritische Niederschlagsdauer beträgt dabei zwischen 19 und 26 Minuten, mit Intensitäten von rund 180 bzw. 150 mm/h. Laut Chronik ereignete sich am 20. August 1802, ausgelöst durch ein heftiges ca. 1-stündiges Gewitter, eine große Überschwemmung und Vermurung der Gemeinde Hötting. Dieses Ereignis bestätigt die Modellrechnung bezüglich der kritischen Regendauer unter einer Stunde, was nicht untypisch für ein Einzugsgebiet dieser Größe ist. Das letzte, größere Starkregenereignis trat am 23.08.2005 auf. Von diesem Ereignis liegen Fotoaufnahmen an zwei verschiedenen Abflusssektionen im Unterlauf vor. Die Querschnittsprofile wurden vor Ort aufgenommen und der Hochwasserstand durch Bildvergleiche abgeschätzt (Abb. 5.5). Die hydraulische Nachrechnung dieses Ereignisses über den Fließgeschwindigkeitsansatz nach Rickenmann (1996) ergibt einen Abfluss von rund 8 m³/s (Tab. 5.1). Unterstellt man einen Geschiebeanteil von 10 %, so entspricht dieses Ereignis einem mit ZEMOKOST simulierten Reinwasserabfluss einer Jährlichkeit von 50 Jahren, ein durchaus plausibler Wert bezogen auf die Wildbachchronik und Anwohnerbefragungen. Im Zuge der Bachbegehungen wurden Hochwasseranschlaglinien im Gerinne identifiziert und nach ihrer Jährlichkeit geschätzt, die ebenfalls hydraulisch nachgerechnet und mit den Ergebnissen von ZEMOKOST verglichen wurden. Das Ergebnis der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit ZEMOKOST ($HQ_{150} = 21 \text{ m}^3/\text{s}$) ist im untersten Wertebereich der Faustformeln mit der Abschätzung nach Hoffmann (1970) und Melli (1924) vergleichbar. In Relation zu den Hochwasserformeln erscheint der Bemessungswert der Modellrechnung durchaus plausibel, da letztere die Pufferwirkung von Erosionshalden und Schuttkörpern im Gerinne, wie sie am Höttinger Graben anzutreffen sind, nur insofern berücksichtigen, als Einzugsgebiete mit derartigen Eigenschaften im Kollektiv zur Herleitung der Formeln enthalten waren.

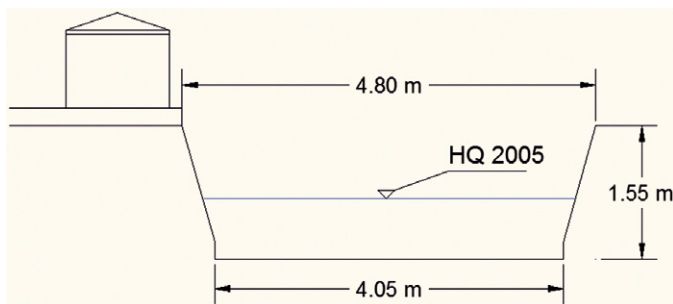


Abb. 5.5 Ereignis 23.08.2005 am Höttinger Bach, Profil 1, Dorfgasse 60 (Foto: R. Kain; Kammerlander 2011)

Tab. 5.1 Hydraulische Nachrechnung des Ereignisses 23.08.2005 am Höttinger Bach an zwei Abflussprofilen im Vergleich mit den Ergebnissen des Niederschlag-Abfluss-Modells ZEMOKOST

Profil	d_{90} [m]	B [m]	H [m]	I []	v [m/s]	Q [m ³ /s] Hydraulische Nachrechnung	HQ_{50} [m ³ /s] ZEMOKOST
1	0,05	4,20	0,6	0,5	3,1	8,0	7,9
2	0,10	5,50	0,9	0,05	1,8	8,6	7,9

5.2.3. Städtische Einzugsgebiete

Der Vorteil bei der Modellierung von städtischen Einzugsgebieten ist, dass diese Systeme meist sehr gut beobachtet sind. In besiedelten Gebieten stehen in Österreich normalerweise Niederschlagsdaten zur Verfügung. Des Weiteren zeichnen die Abwasserverbände die Kläranlagenzuläufe auf, aus welchen im Falle von Mischsystemen der Niederschlagsabfluss ermittelt werden kann. Zudem werden von den Kanalnetzbetreibern größerer Städte oft auch weitere Messstationen betrieben und somit Durchflüsse im Kanalsystem, Wasserstände in Kanälen oder Speicherbecken oder Entlastungsabflüsse an Mischwasserüberlaufbauwerken aufgezeichnet.

Die Art der Plausibilitätsprüfung in städtischen Einzugsgebieten hängt stark von der Modellanwendung ab. Die beiden zu unterscheidenden Anwendungsgebiete sind dabei der Nachweis der Leistungsfähigkeit der Entwässerungssysteme in Hinblick auf Überstau und Überflutung sowie die Leistungsfähigkeit in Hinblick auf Gewässerschutz. Während in der ersten Anwendung vor allem extreme Starkniederschläge relevant sind (und vom Modell richtig abgebildet werden müssen), sind in der zweiten Anwendung die Schmutzstoffemissionen bei den wesentlich häufiger auftretenden mittleren Ereignissen von Interesse. Da dabei die Schmutzstoffemissionen in die Vorfluter im langjährigen Durchschnitt berechnet werden, sind hier auch Kalibrierung und Plausibilisierung auf Summenparameter geeignet. Zu diesen beiden Anwendungen bestehen auch entsprechende Regelwerke (ÖWAV-Regelblatt 11, 2009 sowie ÖWAV-Regelblatt 19, 2007b), in welchen die Anforderungen an Simulation, Modellkalibrierung und Sensitivitätsanalyse beschrieben sind. Zusätzlich finden sich Hinweise in der Literatur (Kleidorfer et al. 2008; Kleidorfer et al. 2011). In beiden Anwendungen sind es üblicherweise die Sommermonate, in welchen die relevanten Niederschlagsereignisse auftreten. Hier kommt es zu konvektiven Starkniederschlägen, die zu Mischwasserüberläufen oder Kanalnetzüberlastungen führen. Winterprozesse (z. B. Schneeschmelze) sind in städtischen Gebieten Österreichs daher üblicherweise vernachlässigbar.

Wegen der schnell ablaufenden Prozesse auf stark versiegelten städtischen Flächen ist eine Simulation in hoher zeitlicher Auflösung von z. B. 5 Minuten erforderlich. Dementsprechend müssen auch die Modelleingangsdaten (Niederschlagsdaten) in dieser zeitlichen Auflösung vorliegen. Um die Messdaten für einen Vergleich der Ganglinien verwenden zu können, ist auch hier dieselbe zeitliche Auflösung erforderlich. Sollte diese nicht gegeben sein, können die vorhandenen Daten aber immer noch zur Plausibilisierung verwendet werden. Interessant ist die Information, an welchen Punkten im System die Leistungsfähigkeit überschritten wird,

an welchen bei Mischwasserüberlaufbauwerken häufig bzw. nie Entlastungsabflüsse auftreten, oder welche Speicherbecken häufig gefüllt werden. Besonders zuverlässig in der Beobachtung sind dabei solche Vorkommnisse im Betrieb, die Maßnahmen des Betriebspersonals nach sich ziehen, wie beispielsweise die Füllung von Speicherbecken (hier ist im Anschluss eine Beckenreinigung erforderlich). Bei Verwendung des Kläranlagenzulaufs zur Plausibilisierung ist darauf zu achten, dass dieser als Summenwert über einen längeren Zeitraum praktisch nur vom Trockenwetterzufluss beeinflusst wird. Eine geringe Abweichung des angenommenen vom realen Trockenwetterzufluss von wenigen Sekundenlitern wirkt sich als Summe derartig stark aus, dass nicht mehr auf den Niederschlagsabfluss geschlossen werden kann. Beispielsweise führt eine Abweichung im Trockenwetterzufluss um 1 l/s zu einer Änderung der Jahressumme von über 30.000 m³. Eine Verwendung des Kläranlagenzulaufes eingeschränkt auf einen kürzeren Zeitraum, z. B. ein Niederschlagsereignis, ist hingegen durchaus möglich.

Derartige Erfahrungen können mit den Ergebnissen der Niederschlag-Abfluss-Simulation verglichen werden. Als Ergebnis sollten im Modell und in der Realität dieselben kritischen Punkte identifiziert werden können. Jedoch auch die Beobachtung, dass ein Überstau oder eine Entlastung bei einem bestimmten Ereignis nicht aufgetreten sind, ist eine wertvolle Wahrnehmung. So können die modellierten Abflüsse mit der maximalen Leistungsfähigkeit der Kanalrohre verglichen werden. Wenn in der Realität kein Überstau wahrgenommen wird, sollten die modellierten Abflüsse kleiner als die maximale Leistungsfähigkeit sein. Zu beachten ist hierbei allerdings auch, dass Überstau manchmal nicht als solcher wahrgenommen wird, da es meist nicht auffällig erscheint, wenn während eines starken Niederschlagsereignisses das Wasser auf der Straße steht und nicht sofort abrinnt.

Ein Beispiel für eine Plausibilisierung eines Niederschlag-Abfluss-Modells in einem städtischen Kanalsystem an einem Mischwasserüberlaufbauwerk zeigt Abb. 5.6. Vor der Kalibrierung des Modells wird die Spitze der Abflussswelle unterschätzt, obwohl die Übereinstimmung bei niederen Abflüssen sehr gut ist (Abb. 5.6). In diesem Fall deutet dies darauf hin, dass die Modellparameter für unbefestigte Flächen (die erst bei starken Niederschlagsintensitäten abflusswirksam werden) kalibriert werden müssen. Nach der Kalibrierung (Abb. 5.6) ist die Übereinstimmung auch für die Abflussspitze sehr gut. In diesem Fall stehen Wasserstandsmessungen in einem Mischwasserüberlaufbauwerk als Kalibrierungsdaten zur Verfügung, jedoch könnte eine Plausibilisierung der Simulationsergebnisse hier auch ohne detaillierte Messung durchgeführt werden. Abb. 5.6 zeigt auch die Höhe der Überlaufschwelle im Bauwerk. Die Messung überschreitet diesen Wert, es kommt also zu einer Mischwasserentlastung während dieses Ereignisses. Wenn diese Entlastung in der Simulation nicht auftritt (Abb. 5.6), jedoch in der Natur beobachtet wird, kann dieser Vergleich zur Identifikation einer Fehlfunktion und damit zur Verbesserung des Modells verwendet werden.

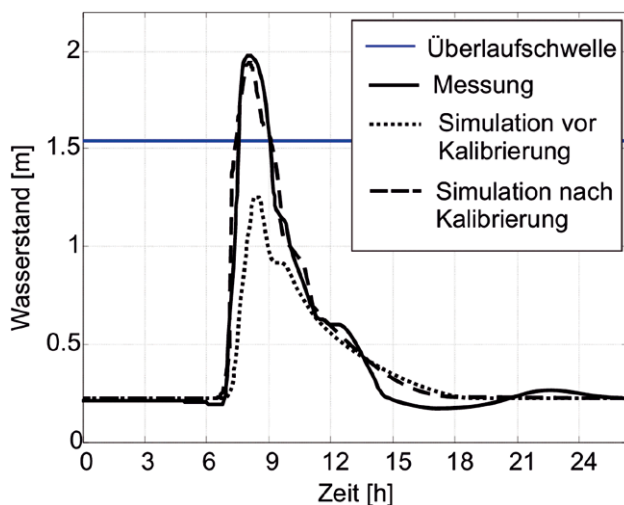


Abb. 5.6 Vergleich von simulierten und gemessenen Wasserständen im städtischen Kanal von Innsbruck vor und nach der Kalibrierung für ein Ereignis am 7. Juli 2005. Die oberhalb an die Kanalisation angeschlossene Fläche beträgt ca. 590 ha

BOX 5.4: Plausibilisierung

Es wird empfohlen, die Modellergebnisse mit relevanten hydrologischen Informationen zu plausibilisieren. Dies ist besonders dann wichtig, wenn keine Abflussdaten für die Validierung vorhanden sind.

In ländlichen Einzugsgebiete zählen zu solchen Informationen das Auftreten von Sättigungsflächen und Oberflächenabfluss, Erosionsspuren, Bildauswertungen von Wasserspiegelanschlagslinien, Informationen von Kraftwerksbetreibern, Schneelage und die Übertragung von Informationen aus Nachbargebieten. In Wildbacheinzugsgebieten sind auch besonders die Prozesskenntnis aus Begehungen des Gebietes, Hinweise Ortsansässiger, die Auswertung von Chroniken und geomorphologische Indikatoren wichtig. In städtischen Einzugsgebieten können die Modellergebnisse mit Beobachtungen der Kanalnetzbewirtschaftung plausibilisiert werden.

5.3. Spezielle Aspekte bei Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit (HQ_n)

5.3.1. Grundsätzliche Vorgangsweise

Ziel der Niederschlag-Abfluss-Modellierung ist häufig die Ermittlung von Scheitelabflüssen HQ_n einer bestimmten Jährlichkeit n sowie die mit einem HQ_n verbundenen charakteristischen Wellenformen und Frachten. Erstere werden vor allem für den Nachweise der hydraulischen Leitungsfähigkeit von Bauwerken und Gerinnestrecken benötigt, letztere für die Dimensionierung von Rückhaltebecken. Dabei ist zu beachten, dass die Ergebnisse von N-A-Simulationen nicht unmittelbar Bemessungswerte, sondern Erwartungswerte der Kenngrößen darstellen. Die Bemessungswerte werden unter Berücksichtigung zusätzlicher Entscheidungsfaktoren im Zuge der Projektierung festgelegt, wie z. B. Berücksichtigung des Feststofftransports, und Berücksichtigung von Unsicherheiten im Gesamtkonzept (siehe Kapitel 1.2.).

Die Berechnung von Hochwasserscheitelabflüssen mit einer bestimmten Jährlichkeit (z. B. HQ_{100}) auf Basis von Niederschlag-Abfluss-Modellen erfordert neben der genauen Erfassung bzw. Modellierung der Niederschlag-Abfluss-Prozesse auch die Berücksichtigung stochastischer bzw. statistischer Gesichtspunkte. Zudem sind meist große Ereignisse (entsprechend großer Jährlichkeiten, Abb. 5.7) von Interesse. Um die Ergebnisse der N-A-Modellierung als Bemessungsgrundlage in möglichst hoher Qualität verwenden zu können, sind für diese Aufgabenstellung daher einige spezielle Aspekte zu beachten.

Blöschl und Merz (2008) und DWA (2012) geben weiterführende Empfehlungen betreffend den Umgang mit dem Zusammenspiel von Hochwasserstatistik, Abflussprozessen und der Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit.

Modellwahl: In den häufigsten Fällen werden Ereignismodelle zur Ermittlung von HQ_n -Kennwerten verwendet, die je nach Qualität und Datenlage einfach bis flächendetailliert strukturiert sein können. Aber auch kontinuierliche Modelle kommen immer mehr zum Einsatz, wobei unter Verwendung langer generierter Niederschlagsreihen langjährige Abflussreihen berechnet werden, aus denen die statistischen Eigenschaften der Hochwässer ermittelt werden (z. B. Rogger et al. 2012a, b). Vorteil gegenüber den Ereignismodellen ist, dass sich bei dieser Vorgangsweise die Jährlichkeit ähnlich einer statistischen Analyse von beobachteten Hochwasserscheiteln direkt ergibt und Einflussgrößen und Interaktionen auf die Jährlichkeit des zu ermittelnden Abflusses, wie Abflussbeiwert, Vorbefeuchtung und Niederschlagsdauer implizit enthalten sind. Dem steht der Nachteil der größeren Komplexität gegenüber.

Wahl der Eingangsgrößen: Für Ereignismodelle werden Regenspendenlinien als Eingangsgrößen benötigt. Dafür können regionalisierte Werte und Auswertungen von Einzelstationen verwendet werden (siehe Kapitel 2.2.3.). Ein zentrales Element ist dabei die Wahl der Jährlichkeit des Niederschlags (siehe Kapitel 5.3.2.). In machen Fällen wird die Jährlichkeit des Nie-

erschlags nicht vorab gewählt, sondern in einer Weise, dass die Jährlichkeit des simulierten Abflusses der Jährlichkeit der Abflussstatistik aus den Beobachtungen entspricht.

Parameterwahl: In Abhängigkeit von der Datenlage können die Modellparameter aufgrund der Abflussstatistik, der Kalibrierung an beobachtete Abflussereignisse oder als A-priori-Werte gewählt werden (siehe Kapitel 5.3.3.).



Abb. 5.7 Ein hundertjährliches Hochwasserereignis am Vorderberger Bach, Kärnten, am 29.08.2003, $HQ = 125 \pm 25 \text{ m}^3/\text{s}$, Fläche 27 km^2 (Foto: Moser)

5.3.2. Wahl der Eingangsgrößen und deren Jährlichkeit

(a) Eingangsgrößen – Niederschlagsdauer

In der Regel werden Bemessungsniederschläge unterschiedlicher Dauer für die Berechnung herangezogen, und der maximale Scheitel wird als Grundlage für die Bemessung verwendet. Diese Vorgangsweise beruht auf der Annahme, dass die Jährlichkeit dieses maximalen Scheitels in etwa der Jährlichkeit des Niederschlags entspricht (siehe Diskussion in Abschnitt (b) weiter unten sowie in Viglione et al. 2009; Viglione and Blöschl 2009). Abb. 5.8 zeigt als Beispiel die Abflusssimulation mittels AMOLISK, ein für Niederösterreich entwickeltes N-A-Modell, das im Wesentlichen das Lutz-Verfahren zur Bestimmung von Abflussbeiwert und Anlaufzeit in unbeobachteten Gebieten verwendet (Lutz 1984). Es wurde ein 100-jährlicher, gewichteter Bemessungsregen als Block (konstante Intensität während des Ereignisses) mit starker Niederschlagsabminderung angesetzt (Kapitel 2.2.5.). Der Endabflussbeiwert nach Lutz beträgt 0.627 und die Anlaufzeit 41 min. Aus Abb. 5.8 ist zu erkennen, dass der maximale Abflussscheitel bei der Dauer von 80 Minuten auftritt. Das ist länger als die Anlaufzeit. Das entspricht der allgemeinen Aussage von Viglione and Blöschl (2009), dass die kritische Niederschlagsdauer meist in der Größenordnung der doppelten Anlaufzeit (bzw. Zeitkonstante der Abflusskonzentration) liegt.

Bei Hochwasserereignissen im Hochgebirge, insbesondere bei großräumigen Ereignissen, ist oft ein Übergang von Regen auf Schnee zu beobachten (z. B. Blöschl et al. 2013a). Dies hängt mit dem Temperatursturz beim Durchgang einer Front zusammen. Eine derartige Verkürzung der Regendauer sollte, wenn relevant, berücksichtigt werden, ebenso eine Verlängerung durch etwaige Schneeschmelze.

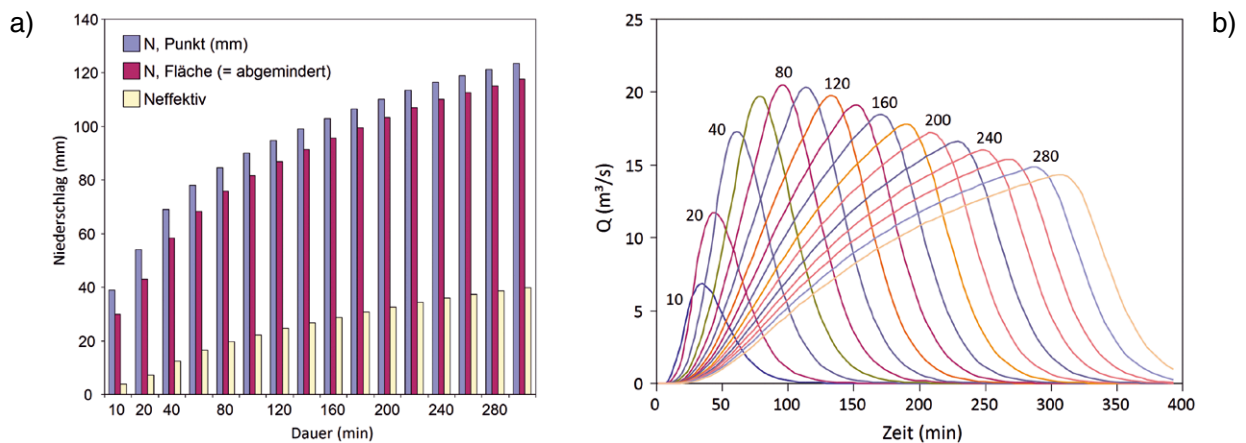


Abb. 5.8 Bemessungsereignisse für den Dürnbergbach, Waldviertel: Einzugsgebietsfläche 4,45 km², (a) N_{100} -gewählter Ereignisniederschlag für die unterschiedlichen Starkregendauern, (b) Bemessungsganglinien für verschiedene Niederschlagsdauern (min)

Wenn ein See im Einzugsgebiet liegt, ist die Abflussreaktion verzögert, wodurch sich die kritische Regendauer verlängert. So ergibt bei der Bestimmung von Bemessungshochwässern für Hochwasserentlastungen von Talsperren, in denen ein Wasserrückhalt stattfindet, meist eine Welle mit kleinerem Scheitelwert, jedoch größerer Fülle, den maßgebenden maximalen Wasserstand im Becken und damit einen größeren Abfluss an der Entlastungsanlage als die Zulaufwelle mit der maximalen Abflussspitze. Es ist deshalb eine Retentionsberechnung mit Wellenscharen (Niederschläge unterschiedlicher Dauer) unumgänglich. Als Beispiel zeigt Abb. 5.9 die Zufluss- und Abflussganglinien des geplanten Speichers Kühtai, Tirol. Die Zuflussganglinie in den Speicher hat bei einer Niederschlagsdauer von 10 h einen größeren Scheitel als bei einer Niederschlagsdauer von 24 h. Der Abfluss über die Hochwasserentlastung hat hingegen bei einer Niederschlagsdauer von 24 h den größeren Scheitel wegen der Seeretention.

Die Bemessung der Hochwasserentlastung für Rückhaltebecken erfolgt in analoger Weise durch Variation der Niederschlagsdauer bei vorgegebener Jährlichkeit und Wahl der Dauer, die den maximalen Wasserstand ergibt. Die weiteren Annahmen bei derartigen Berechnungen (z. B. welche Verschlussorgane als geöffnet/geschlossen anzunehmen sind) erfolgen nach den jeweiligen technischen Richtlinien (z. B. Gutknecht et al. 2009; BMLFUW 2014).

Für die Bemessung des Beckenvolumens von Hochwasserrückhaltebecken und ähnlichen Stauanlagen ist zu bedenken, dass ein Ereignis mit einem Scheitelabfluss von HQ_n nicht eine einzige Fracht, sondern eine statistische Verteilung von Frachten besitzt. In anderen Worten: Es existiert kein n-jährliches Ereignis, sondern nur ein n-jährlicher Scheitelabfluss. Deshalb besteht eine grundsätzlich konsistente Vorgangsweise für die Bestimmung der Hochwasserfracht für Rückhaltebecken darin, eine lange Abflussreihe mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen zu generieren, und diese in Hinblick auf den Abfluss unterhalb des Beckens statistisch auszuwerten. Für die Anwendung von Monte-Carlo-Simulationen sind folgende Informationen erforderlich (Rogger et al. 2011; Rogger et al. 2012a, b):

- Ein stochastisches Niederschlagsmodell, dessen Parameter an lange Zeitreihen des Niederschlags angepasst wurden (eventuell auch stochastische Modellierung der Lufttemperatur, falls Schneeprozesse wichtig sind).
- Ein kontinuierliches Niederschlag-Abfluss-Modell (Soil moisture accounting), dessen Parameter an lange Zeitreihen des Abflusses angepasst wurden.
- Angaben über das hydraulische Verhalten des Rückhaltebeckens, insbesondere des Durchflussverhaltens der Verschlussorgane.

Auf dieser Basis können viele Jahrhunderte von Abflussdaten simuliert werden, woraus das Zusammenspiel von Hochwasserscheitel und Fracht und damit die maßgebenden Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeit unterhalb der Anlage konstruiert werden können.

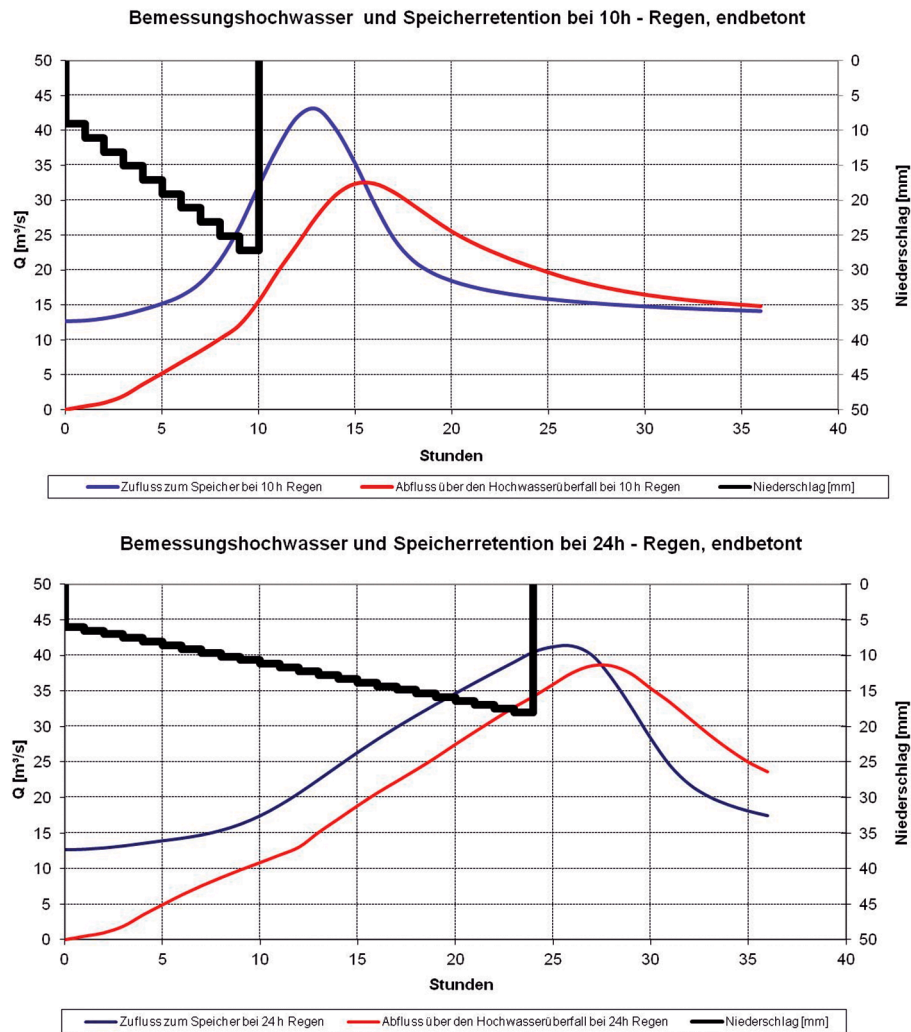


Abb. 5.9 Zufluss- und Abflussganglinien des geplanten Speichers Kühtai, Tirol (7.6 km² natürliches Einzugsgebiet)

Bei wenig aufwendigen Projekten wird das erforderliche Beckenvolumen von Hochwasserrückhaltebecken allerdings in der Regel mittels Ereignismodellen auf Basis von Regenspendenlinien bestimmt. Wiederum werden Niederschläge unterschiedlicher Dauer, aber gleicher Jährlichkeit herangezogen, um damit das maximal erforderliche Beckenvolumen für diese Niederschlagsjährlichkeit zu bestimmen. Dabei wird der Durchfluss des Grundablasses als Ausfluss aus dem Becken angesetzt und die weiteren Annahmen nach den jeweiligen technischen Richtlinien (z. B. BMLFUW 2014) getroffen. Für die Bemessung der Hochwasserentlastung werden i. d. R. wesentlich größere Jährlichkeiten angesetzt als für die Bemessung des Beckenvolumens.

BOX 5.5: Bemessungsniederschläge – Dauer

Das HQ_n kann von Niederschlägen unterschiedlicher Dauer hervorgerufen werden. Für die Berechnung mithilfe von Ereignismodellen sind deshalb unterschiedliche Dauern heranzuziehen, die eine Schar von Hochwasserwellen ergeben. Der größte Scheitelabfluss (gegebenenfalls unter Berücksichtigung der Seerretention) der Wellenschar ist als HQ_n zu verwenden. Für die Bemessung des Volumens von Rückhaltebecken wird bei gegebener Niederschlagsjährlichkeit und Variation der Dauerstufen (Wellenschar) in Abhängigkeit von der Größe des Grundablasses das im Becken gespeicherte Volumen maximiert.

(b) Wahl der Jährlichkeit des Bemessungsniederschlags

Grundsätzlich steht die Jährlichkeit der ermittelten Abflüsse im Vordergrund, da diese in Abhängigkeit von den Modellannahmen nicht der Jährlichkeit der Bemessungsniederschläge entsprechen muss.

Aus statistischer Sicht ist vorerst der Begriff der Jährlichkeit des Niederschlags zu klären. Einem Niederschlagsereignis ist keine eindeutige Jährlichkeit zugeordnet, da es durch mehrere Kenngrößen beschrieben wird (Niederschlagshöhe, Dauer, zeitliche Verteilung), sich die Jährlichkeit aber nur für eine Einzelgröße (z. B. Hochwasserscheitel) definieren lässt. Bei der bivariaten Statistik werden zwei Einzelgrößen (z. B. Hochwasserscheitelwert und Hochwasserfracht) berücksichtigt, die jedoch zur Überführung in eine Jährlichkeit zusätzliche Annahmen über das Speicherverhalten erfordern. Pragmatisch kann man allerdings, entsprechend der Bemessungspraxis eine Jährlichkeit für den Niederschlag definieren, etwa für die Niederschlagshöhe der maßgebenden Niederschlagsdauer aus der Regenspendenlinie.

Wichtiger für die Ingenieurspraxis ist die Frage nach der Jährlichkeit des ermittelten Abflusses. Der simulierte Abfluss und die damit verbundene Jährlichkeit hängen davon ab, wie die Parameter des N-A-Modells gewählt werden, und nur unter bestimmten Parameterkombinationen entspricht die Jährlichkeit des Abflusses der Jährlichkeit des Niederschlags. Vergleicht man etwa den durch ein N-A-Modell unter Verwendung eines hundertjährigen Niederschlags und eines hundertjährigen Abflussbeiwertes berechneten Abflussscheitel mit der extremwertstatistischen Auswertung des Hochwasserkollektivs, so ergibt das N-A-Modell meist zu große Werte (Viglione et al. 2009; Viglione and Blöschl 2009). Andererseits kann die Kombination hundertjähriger Niederschlag mit dem mittleren Abflussbeiwert zu einer Unterschätzung der hundertjährigen Abflussspitze mit dem N-A-Modell führen.

Es gibt in der Praxis zwei gängige Ansätze, um die Kombination von Niederschlag, Modellparametern und Abflussscheitelwerten so zu gestalten, dass letztendlich die Jährlichkeit des Abflusses gewährleistet ist:

- Wahl der Jährlichkeit des Niederschlags gleich der gesuchten Abflussjährlichkeit (z. B. N_{100} bei HQ_{100}), und Wahl der Modellparameter (Abflussbeiwert, Abflusskonzentration, Routing) so, dass die simulierte Abflusswelle einen Scheitel der gesuchten Jährlichkeit hat.
- Wahl der Modellparameter gemäß Kalibrierung an beobachtete Ereignisse (oder a priori festgelegt) und Wahl der Jährlichkeit des Niederschlags so, dass die simulierte Abflusswelle einen Scheitel der gesuchten Jährlichkeit hat (d. h. N_x bei HQ_{100}).

Der erstere Ansatz wird in Österreich häufig angewendet; die Parameterwahl wird im Kapitel 5.3.4. beschrieben. Bei beiden Ansätzen stellt sich die Frage, bei welcher Kombination von Niederschlagsjährlichkeit und Modellparameter die geforderte Jährlichkeit des Abflusses gegeben ist.

Abb. 5.10a zeigt eine Auswertung von Monte-Carlo-Simulationen für unterschiedliche Klimaverhältnisse, nach der – bei sonst konstanten Parametern – der Abflussbeiwert ungefähr so zu wählen ist, dass er von 60 % der Abflussbeiwerte der Jahreshochwässer unterschritten und von 40 % überschritten wird (roter Kreis). Im Bemessungsfall würde man typischerweise einen größeren Abflussbeiwert wählen, nämlich den eines hundertjährigen Ereignisses, wodurch aber das HQ_{100} überschätzt wird.

Als Beispiel sei Triesting bei Fahrafeld in Abb. 5.10b betrachtet: Der größte Durchfluss ($165 \text{ m}^3/\text{s}$) entspricht etwa einem 20-jährlichen Hochwasser und einem zugehörigen Abflussbeiwert von 0,6. Wenn man die Abflussbeiwerte auf größere Hochwässer extrapoliert, ist ein Abflussbeiwert von etwa 0,7 für das 100-jährliche Hochwasser zu erwarten (blauer Kreis). Der Abflussbeiwert mit einer Unterschreitungshäufigkeit von 60 % in Abb. 5.10b ist hingegen etwa 0,4 (roter Kreis). Das wäre in diesem Fall der Abflussbeiwert, der bei einem N_{100} und Blockregen ein HQ_{100} ergibt.

Merz et al. (2004) rechneten Ereignisabflussbeiwerte in 345 Einzugsgebieten mit einer Fläche zwischen 80 und 10.000 km² aus den Abflussdaten zurück. Im Anhang geben sie für jedes Gebiet den mittlern Abflussbeiwert für Ereignisse mit einer Niederschlagshöhe zwischen 10 und 50 mm (sowie für Ereignisse mit einer Niederschlagshöhe größer 50 mm) an. Merz und Blöschl (2006) geben auch die Abflussbeiwerte an, die in 20 %, 50 % und 80 % der Ereignisse in einem Gebiet unterschritten werden (entsprechend der vertikalen Achse in Abb. 5.10a).

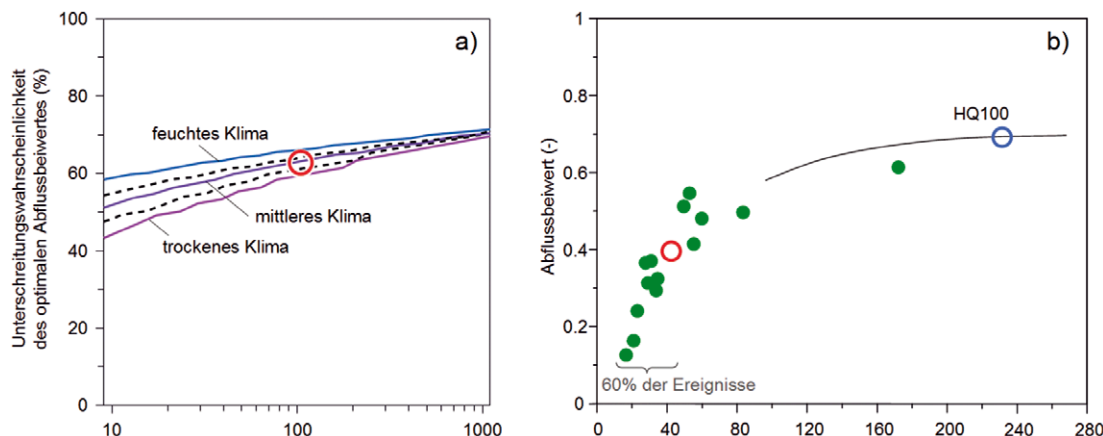


Abb. 5.10 (a) Unterschreitungswahrscheinlichkeit desjenigen Abflussbeiwertes (bezogen auf die Jahreshochwässer), der einen Abflussscheitel mit der Jährlichkeit gleich dem zugehörigen Niederschlag erzeugt. Kurvenparameter ist der mittlere Abflussbeiwert ψ_m aller Ereignisse ($\psi_m = 0,6$ feuchtes Klima; $\psi_m = 0,2$ trockenes Klima). Der Abflussbeiwert ψ ist definiert als Verhältnis von Direktabflussvolumen eines Ereignisses und dem zugehörigen Niederschlag; (b) Grüne Punkte: beobachtete Ereignisabflussbeiwerte der Jahreshochwässer, aufgetragen gegen den zugehörigen Scheitelabfluss für die Triesting bei Fahrafeld (186 km², 750 mm/a Jahresniederschlag). Der blaue Kreis zeigt den Abflussbeiwert, der für das 100-jährliche Hochwasser zu erwarten ist, der rote Kreis den Abflussbeiwert, der bei einem N_{100} und Blockregen ein HQ_{100} ergibt (aus Blöschl und Merz 2008)

BOX 5.6 Eingangsgrößen und deren Jährlichkeit

Der Bemessungsniederschlag, die zeitliche Verteilung des Niederschlags, die Flächenabminderung und die Modellparameter sind nicht isoliert zu wählen, sondern so, dass sie in ihrer Kombination den maßgebenden Niederschlag-Abfluss-Prozess plausibel abbilden, damit der Anspruch einer bestimmten zu ermittelnden Jährlichkeit des Abflusses erfüllt wird.

5.3.3. Wahl der HQ_n -spezifischen Modellparameter

Die übliche Vorgangsweise zur Bestimmung von Modellparametern zur Ermittlung des HQ_n und der zugehörigen Abflusswelle unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Datenlage (Abb. 5.11):

- Sind für das betreffende Einzugsgebiet lange, qualitativ hochwertige Abflussdaten vorhanden, die eine zuverlässige Abflussstatistik zulassen, so wird in der Regel die direkte Kalibrierung des N-A-Modells an die Hochwasserabflussstatistik gewählt. Der HQ_n -Scheitel, hergeleitet aus der Abflussstatistik, wird als Vorgabewert im Modell fixiert und entweder die Bemessungsniederschläge oder die Modellparameter (Abflussbeiwerte, Abflusskonzentration etc.) so gewählt bzw. verändert, dass der vorgegebene HQ_n -Scheitel bestimmter Jährlichkeit gut abgebildet wird. Das Niederschlag-Abfluss-Modell wird nur zur Bestimmung der Wellenformen und eventuell für Sensitivitätsanalysen herangezogen. Eine derartige Datenlage ist in Österreich in vielen großen Gebieten gegeben.
- Sind für das betreffende Einzugsgebiet keine langen, qualitativ hochwertigen Abflussdaten vorhanden, aber Abflussdaten für repräsentative Ereignisse unterschiedlicher Größe und Typs, werden die Modellparameter an die beobachteten Abflussereignisse unterschiedlicher Größe kalibriert. Das Niederschlag-Abfluss-Modell wird zur Bestimmung der Abfluss-

- scheitel und Wellen herangezogen. Eine derartige Datenlage ist in Österreich in vielen Gebieten mittlerer Größe gegeben.
- (c) Sind für das betreffende Einzugsgebiet keine Abflussdaten vorhanden (unbeobachtete Einzugsgebiete), werden die Parameter aus A-priori-Informationen und Prozessüberlegungen abgeleitet. Das Niederschlag-Abfluss-Modell wird zur Bestimmung der Abflussscheitel und Wellen herangezogen. Eine derartige Datenlage ist in Österreich in vielen kleinen Gebieten gegeben.

In allen Fällen ist zu empfehlen, dass Abflussdaten aus benachbarten Gebieten herangezogen werden, um die Parameterbestimmung zu verbessern und insgesamt möglichst umfangreiche Informationen heranzuziehen, wie in Kapitel 4. und im HORA-Projekt (Hochwasser-Risikozonierung Austria) dargestellt (Blöschl und Merz 2008; Merz et al. 2008ab). Ist eine sehr gut abgesicherte regionale HQ_n -Statistik vorhanden, kann jedenfalls wie in (a) verfahren werden. Sind Abflussdaten repräsentativer Ereignisse in den Nachbargebieten vorhanden und die Abflussprozesse in den Gebieten sehr gut vergleichbar, kann jedenfalls wie in (b) verfahren werden.

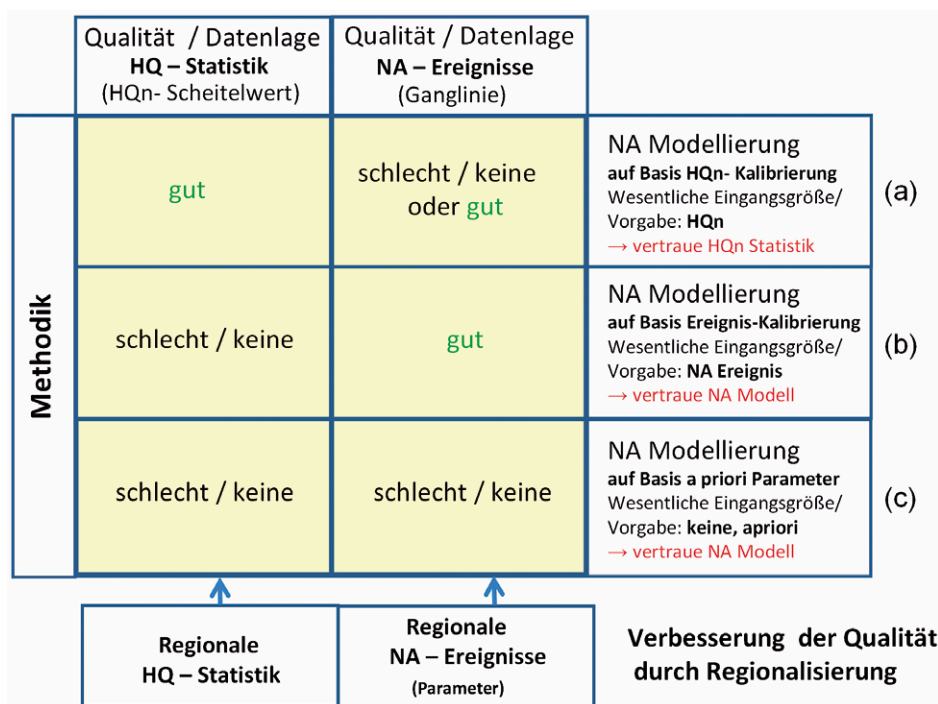


Abb. 5.11 Schema der grundsätzlichen Vorgangsweise bei der Ermittlung von HQ_n mit Niederschlag-Abfluss-Modellen in Abhängigkeit von der Datenlage: (a), (b), (c) ganz rechts beziehen sich auf die Gliederung der folgenden drei Abschnitte

BOX 5.7 Wahl der HQ_n -spezifischen Modellparameter

Es wird empfohlen, Modellparameter womöglich aus beobachteten Abflussdaten zu bestimmen. Falls im betreffenden Gebiet langjährige Abflussdaten vorhanden sind, die eine zuverlässige Pegelstatistik zulassen, sollen die Modellparameter (oder der Bemessungsniederschlag) so gewählt werden, dass der HQ_n -Scheitel wiedergegeben wird. Das N-A-Modell wird nur für die Berechnung der Wellenform verwendet. Falls keine langjährigen Abflussdaten, aber Daten repräsentativer Abflussereignisse vorhanden sind, sollen die Modellparameter an diese Ereignisse kalibriert werden. Das N-A-Modell wird für die Berechnung des Abflussscheitels und der Welle verwendet. Falls keine Abflussdaten vorhanden sind, sollen die Parameter aus A-priori-Informationen bestimmt werden. In allen Fällen ist zu empfehlen, dass Abflussdaten aus benachbarten Gebieten herangezogen werden um die Parameterbestimmung zu verbessern.

(a) Kalibrierung auf Basis HQ_n aus Pegelstatistik

Liegen an der betreffenden Gewässerstelle gut abgesicherte Werte des n-jährlichen Scheitelabflusses aus der Extremwertstatistik eines Pegels vor, so wird in der Regel der n-jährliche Niederschlag der maßgebenden Regendauer in Rechnung gesetzt und die Modellparameter werden so gewählt, dass das Modell den entsprechend vorgegebenen HQ_n -Scheitelabfluss wiedergibt (jährlichkeitsbezogene Modellkalibrierung). Die Kalibrierung der Wellenform (Abflusskonzentration und entsprechende Wellenanstiegs- und Abstiegszeiten, Wellenrouting etc.) ist auch bei diesem Verfahren anhand von beobachteten N-A-Ereignissen durchzuführen. Der hierbei definierte spezifische Abflussbeiwert ergibt sich aus dem Verhältnis Direktabflussvolumen der synthetischen HQ_n -Hochwasserwelle zum Volumen des flächenabgeminderten n-jährlichen Niederschlags mit einer Dauerstufe gleich der Konzentrationszeit. Eine Sensitivitätsanalyse ist sinnvoll, indem z. B. HQ_n -Wellen mit unterem bzw. oberem Schwankungsbereich von HQ_n bzw. unterschiedliche Konzentrationszeiten und unterschiedliche n-jährliche Niederschläge (MaxMod, gewichtete Bemessungsniederschläge, Ökostra, siehe Kapitel 2.2.3.) analysiert werden (Moser 2016). Abb. 5.12 zeigt ein Beispiel für die Abflussstatistik, die als Vorgabe für das HQ_{100} dient. Abb. 5.13 zeigt die entsprechende Kalibrierung an das HQ_{100} von $160 \text{ m}^3/\text{s}$ durch entsprechende Wahl des Abflussbeiwerts.

Falls eine sehr gut abgesicherte regionale HQ_n -Statistik vorhanden ist, kann das Verfahren auch für Gebiete mit kürzeren oder nicht vorhandenen Abflussreihen verwendet werden. Bei der räumlichen Übertragung der kalibrierten HQ_n -spezifischen Parameter der Pegel Einzugsgebiete auf das betreffende Einzugsgebiet sind die örtlich unterschiedlichen Niederschlags- und Gebietsverhältnisse (Abflussbildung, Konzentrationsverhalten) zu berücksichtigen. Entspricht das betreffende Gebiet in etwa den regionalen Verhältnissen, so können die spezifischen Abflussbeiwerte der Analyse von Pegeln in der Region direkt übernommen werden. Im Zuge der Übertragung sind der maßgebende örtliche Niederschlag und der Abflussbeiwert zu wählen, der der maßgebenden Niederschlagsdauer entspricht. Bei der Übertragung in Gebiete mit kürzerer Konzentrationszeit ist auch die maßgebende Niederschlagsdauer kürzer. Das Verfahren liefert umso bessere Ergebnisse, je ähnlicher die zu vergleichenden Einzugsgebiete (das betreffende Einzugsgebiet und die Pegel Einzugsgebiete) sind. Daher ist danach zu trachten, möglichst viele regionale bzw. bei Fehlen von vergleichbaren Pegeln auch überregionale Pegel mit ähnlichen Eigenschaften und Flächen zur statistischen „ HQ_n -Kalibrierung“ der N-A-Modelle und Übertragung heranzuziehen. Statistisch basierte Gebietsfaktoren, Spendendiagramme und die regional ermittelten HQ_n -spezifischen Abflussbeiwerte sind wertvolle Hilfsmittel, um die Gebiete möglichst einfach und praxisorientiert vergleichen und übertragen zu können. Abb. 5.14 und Abb. 5.15 zeigen beispielhaft Auswertungen, die die regionale Übertragung unterstützen können.

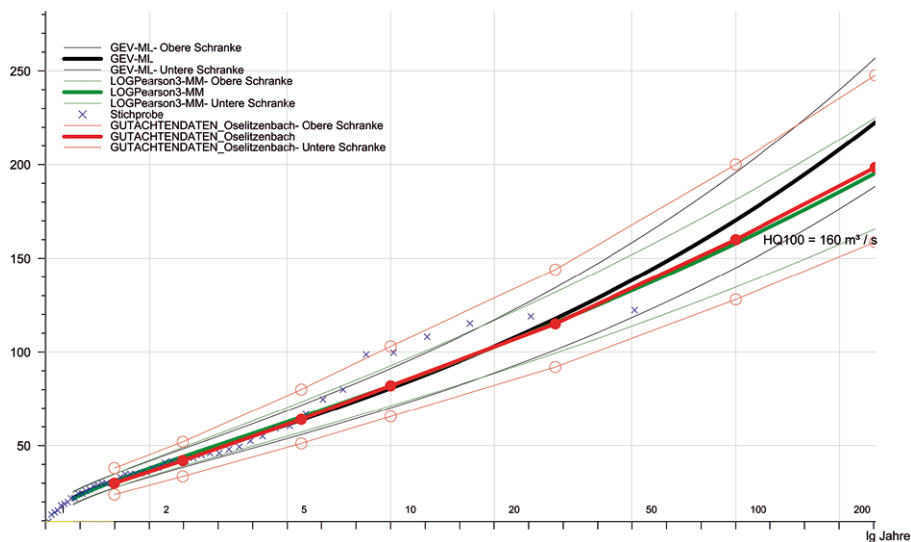


Abb. 5.12 Statistische Auswertung für den Pegel Oselitzenbach, Kärnten, $HQ_{100} = 160 \text{ m}^3/\text{s}$, Fläche = $24,1 \text{ km}^2$, Gebietsfaktor $GF_{100} = 160 / 24,1 \wedge 0,6 = 23,7$

Wird die Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit dem Ziel hydrologischer Längenschnitte durchgeführt, können die Abflusswellen zwischen den Pegeln mit Niederschlag-Abfluss-Modellierung auf zwei Arten berechnet werden: (i) für jeden Standort einen eigenen Bemessungsniederschlag (mit unterschiedlicher Dauer/Intensität), (ii) flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit einer räumlichen Niederschlagsverteilung, die mit den HQ_n aus Pegeldata konsistent ist (geringere Niederschläge stromabwärts).

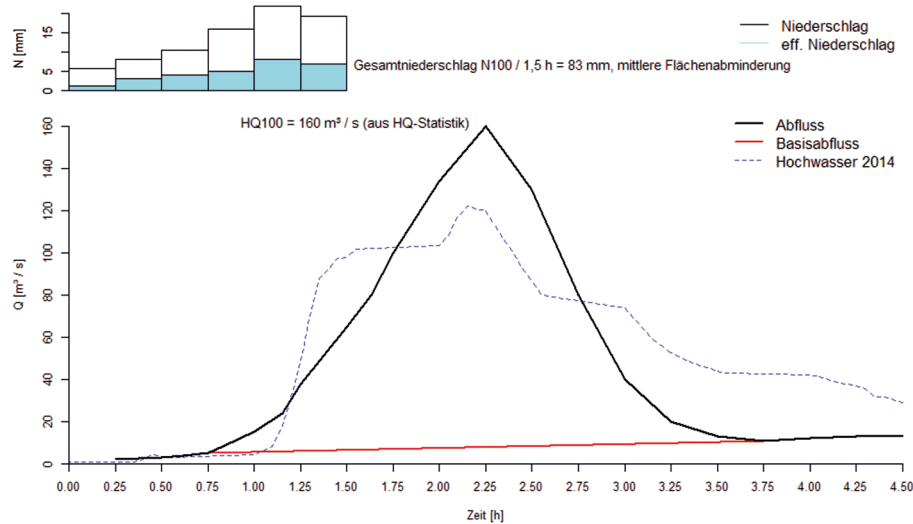


Abb. 5.13 Statistisch basierte Kalibrierung des N-A-Modells an das HQ_{100} aus der Statistik ($HQ_{100} = 160 \text{ m}^3/\text{s}$), N -Input: gewichteter Bemessungsniederschlag N_{100} in 1,5 h = 99 mm, N bei mittlerer Flächenabminderung = 83 mm; spezifischer HQ_{100} -Abflussbeiwert 0,34. Berechnung mittels des IHW-Modells

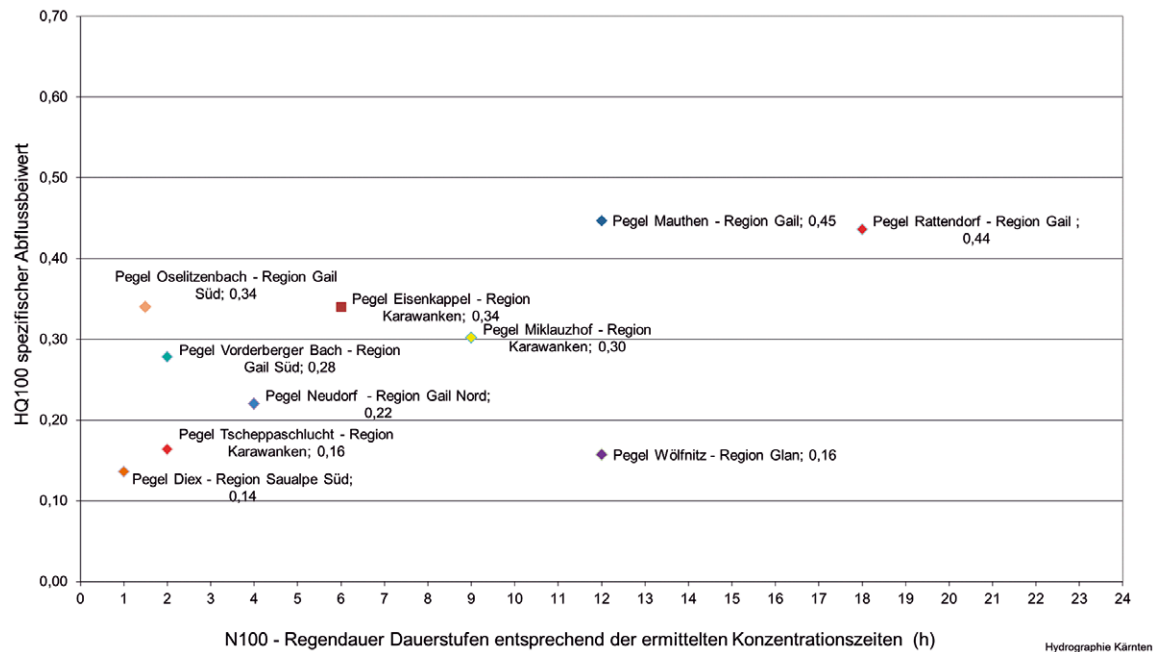


Abb. 5.14 HQ_{100} -spezifische, regionale Abflussbeiwerte kleiner Einzugsgebiete in Kärnten ermittelt durch Kalibrierung an HQ_{100} aus der HQ -Statistik mit N_{100} -gewichteten Bemessungsniederschlägen und Dauerstufen entsprechend der kalibrierten Abflusskonzentrationszeit

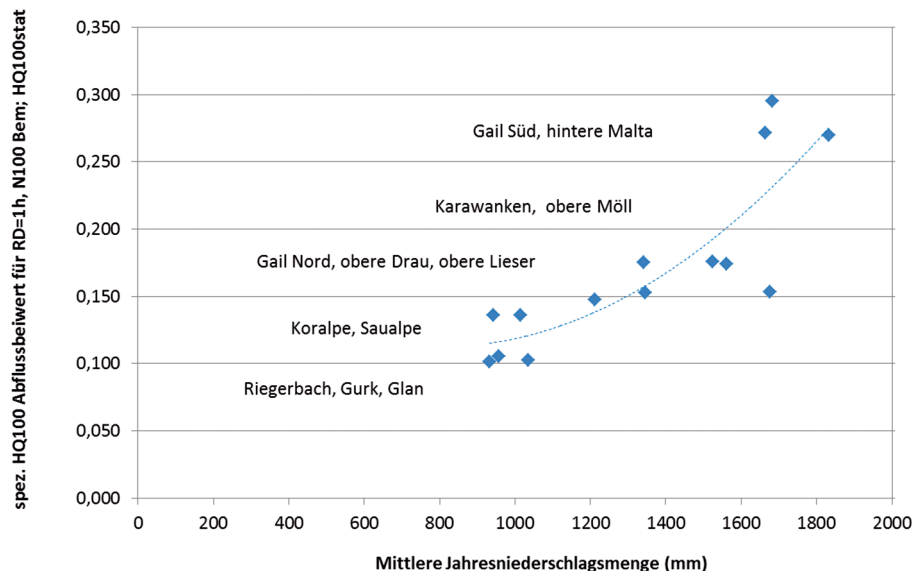


Abb. 5.15 HQ_{100} -spezifische, regionale Abflussbeiwerte im Zusammenhang mit dem mittleren Jahresgebietsniederschlag: Rückgerechnet aus HQ_{100} aus der HQ -Statistik und N_{100} -gewichtete Bemessungsniederschläge mit Dauerstufen entsprechend der Konzentrationszeit. Analyse Hochwasserszenarien-katalog Kärnten (Gutknecht et al. 2001, siehe auch Holzeis et al. 2014). Derartige Zusammenhänge sowie die Geologie unterstützen die Übertragung auf Gebiete ohne bzw. mit nicht repräsentativen Abflussdaten

BOX 5.8: Kalibrierung auf Basis HQ_n aus Pegelstatistik

Bei der Kalibrierung auf Basis HQ_n aus Pegelstatistik ist die Kalibrierung der Wellenform anhand von beobachteten N-A-Ereignissen durchzuführen. Falls eine sehr gut abgesicherte regionale HQ_n -Statistik vorhanden ist, kann das Verfahren auch für Gebiete mit kürzeren oder nicht vorhandenen Abflussreihen verwendet werden. Bei der räumlichen Übertragung der kalibrierten HQ_n -spezifischen Parameter der Pegel Einzugsgebiete auf das betreffende Einzugsgebiet sind die örtlich unterschiedlichen Niederschlags- und Gebietsverhältnisse zu berücksichtigen. Eine regionale Zusammenschau der Analyseergebnisse ist für die Wahl der N-A-Parameter sehr hilfreich. Bei der N-A-Modellierung für die Erstellung hydrologischer Längenschnitte kann für jeden Standort ein eigener Bemessungsniederschlag oder eine räumliche Niederschlagsverteilung verwendet werden, die jeweils mit den HQ_n aus Pegeldaten konsistent sind.

(b) Kalibrierung auf Basis beobachteter Abflussereignisse

Der Umstand, dass sich Abflussprozesse oft beim Übergang von kleineren bis mittleren Hochwässern zu Extremereignissen grundlegend ändern, erschwert die Kalibrierung der Modellparameter, wenn Hochwasserabflüsse einer großen Jährlichkeit (z. B. HQ_{100}) gesucht sind (Gutknecht 1994). In der Regel nimmt der Ereignisabflussbeiwert mit der Größe des Ereignisses zu, und die Parameter der Abflusskonzentration (Speicherzeiten, Laufzeiten) nehmen mit der Größe des Ereignisses ab. Dies liegt daran, dass bei größeren Ereignissen meist ein größerer Teil des Gebiets zum Direktabfluss beiträgt, und der Abflussprozess wegen des größeren Anteils an oberflächigen oder oberflächennahen Abflusswegigkeiten schneller verläuft. Daher sollte das Modell womöglich auch an extremen Abflussereignissen kalibriert werden (siehe Abb. 5.16). Für die Kalibrierung anhand von Abflussdaten einzelner Ereignisse gelten daher in gleicher Weise die in Kapitel 4. ausgeführten Empfehlungen mit besonderer Berücksichtigung des Übergangs von kleinen/mittleren auf große Ereignisse. Die aus den Abflussdaten ermittelten Veränderungen der Modellparameter mit der Größe des Ereignisses sind zu dokumentieren und die Wahl der Parameter für die Bemessungssituation ist zu begründen (siehe Kapitel 8., Synthesebeispiele Pram, Weerbach). Ist eine Kalibrierung des Modells im Extrembereich nicht möglich, sollten die Parameter des Modells mit den Modellparametern beobachteter extremer Ereignisse innerhalb hydrologisch ähnlicher Regionen hergeleitet wer-

den. Eine solche Vorgehensweise ist jedoch nur bei entsprechend guter Modellkenntnis und Modellvergleichbarkeit möglich. Zudem muss die Modellstruktur in der Lage sein, die Veränderungen der Abflussprozesse bei zunehmender Ereignisgröße wiederzugeben.

Im Regelfall werden auf Basis der an N-A-Ereignissen kalibrierten Modellparameter die synthetischen HQ_n -Wellen ermittelt, indem nicht die beobachteten Niederschläge, sondern die Bemessungsniederschläge angesetzt werden. Hochwässer von bestimmter Jährlichkeit können in der Natur durch verschiedenste Niederschlag-Abfluss-Prozesse hervorgerufen werden. Es ist daher auch beim Modellieren eine Vielfalt von Szenarien und Parameterkombinationen möglich, die zu dem Scheitelwert HQ_n führen. Die Variation der Parameter im Sinne einer Sensitivitätsuntersuchung (Kapitel 6.1.2.) ist daher vor allem bei dieser Ermittlungsmethode angebracht, um das Spektrum der möglichen Ergebnisse aufzuzeigen.

Die Annahme von Modellparametern, die zur Maximierung von Abflussscheitelwerten führt, ist jedoch nicht zu empfehlen (siehe Abb. 5.10), da diese tendenziell die HQ_n überschätzen, sondern Parameter, die näherungsweise bei vorgegebener Jährlichkeit des Niederschlags zur gleichen Jährlichkeit des Abflussscheitels führen. Je nach hydrologischer Situation verändern sich die Modellparameter unterschiedlich mit der Ereignisgröße. Abb. 5.17 zeigt ein Beispiel. Die linken Kurven beziehen sich auf die Weissach bei Zwing (Vorarlberg). Aufgrund orografischer Verstärkung ist der Niederschlag hoch und anhaltend mit einer mittleren jährlichen Niederschlagsmenge von etwa 2.000 mm/a. Bei kleinen Ereignissen liegen die Ereignisabflussbeiwerte zwischen 0.4 und 0.9 und bei zunehmender Ereignisgröße bei 0.8. Dies bedeutet, dass sich die Abflussbeiwerte mit der Jährlichkeit des Spitzenflusses kaum ändern. Wenn der Niederschlag extremer wird, würde man keine größeren Erhöhungen der Abflussbeiwerte erwarten, da sie bereits nahe bei Eins liegen. Die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve des Einzugsgebiets zeigt tatsächlich eine Abwärtskrümmung, und aufgrund der Analyse der Abflussbeiwerte würde man erwarten, dass sich der Trend fortsetzt, vorausgesetzt, dass das Regenregime ähnlich bleibt. Die Grafiken in Abb. 5.17 rechts zeigen die Wulka bei Schützen (Burgenland) mit einem Jahresniederschlag von weniger als 600 mm/a. An der Wulka sind die Abflussbeiwerte viel niedriger. Für die kleinsten Ereignisse sind die Abflussbeiwerte geringer als 0,05 und sie nehmen mit steigender Jährlichkeit sehr signifikant zu. Der Abflussbeiwert der größten Ereignisse beträgt 0,3. Wenn der Niederschlag extremer wird, würde man erwarten, dass die Abflussbeiwerte auf 0,5 und mehr steigen. Die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve des Einzugsgebiets weist eine Aufwärtskrümmung auf und aufgrund der Analyse der Abflussbeiwerte würde man erwarten, dass sich der Trend bei größeren Jährlichkeiten fortsetzt.

Auch im Fall der Kalibrierung auf Basis beobachteter Abflussereignisse ist eine regionale Einordnung der Analysen wichtig. Jedenfalls sollten die Kalibrierereignisse im Vergleich zum maßgebenden statistischen N-A-Szenario für das betrachtete Einzugsgebiet bewertet werden (Vergleich, Bewertung und Festlegung maßgebender Konzentrationszeiten, maßgebender Regendauern und Mengen, maßgebender Abflussbeiwerte in Abhängigkeit von Regendauer und Menge zwischen betrachtetem Gebiet und Kalibrierungs-Gebieten). Zum Beispiel sind die Abflussbeiwerte eines sehr großen, langen Niederschlag-Abfluss-Ereignisses (über 48 h) an einem Pegel mit entsprechender Einzugsgebietsgröße und Konzentrationszeit nicht unbedingt maßgebend für das HQ_n in kleinen Einzugsgebieten mit Konzentrationszeiten von einigen Stunden und kürzer, auch wenn das betrachtete Einzugsgebiet innerhalb des Pegel-einzugsgebiets liegt. Hierzu sind Analysen von kürzeren, großen Ereignissen in kleinen Einzugsgebieten (in der Region) womöglich wesentlich aussagekräftiger und daher mit einzubeziehen. Diagramme mit der Darstellung der Modellparameter (z. B. Abflussbeiwerte von verschiedenen Ereignisauswertungen in der Region, auch unterschiedlicher Einzugsgebietsgrößen und Konzentrationszeiten) sind sehr hilfreich für die räumliche Übertragung.

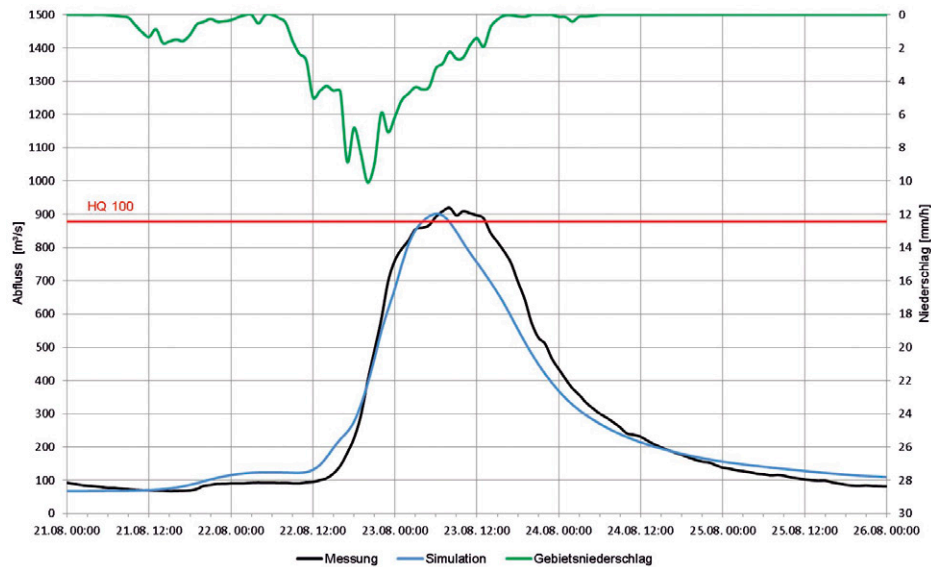


Abb. 5.16 Kalibriertes Ereignismodell (Larsim) für das Gebiet Lechaschau am Lech, Fläche 1.012 km², Ereignis vom 23.08.2005

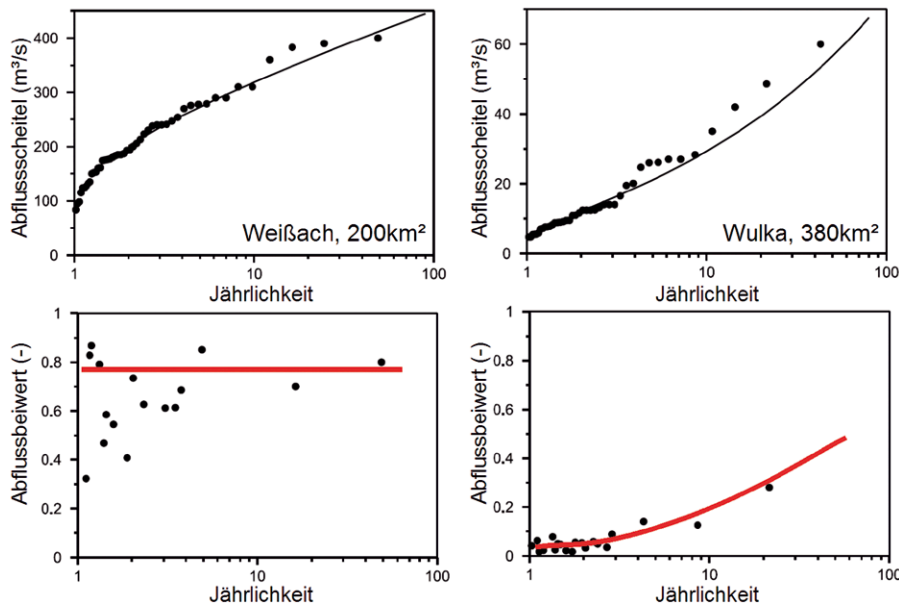


Abb. 5.17 Maximale jährliche Durchflüsse und zugehörige Ereignisabflussbeiwerte: Im Weißbachgebiet bei Zwing (links, 199 km²) sind die Abflussbeiwerte durchwegs hoch, im Wulkagebiet bei Schützen (rechts, 383 km²) sind sie bei kleinen Ereignissen klein und nehmen stark zu. Der Abflussbeiwert ψ ist definiert als Verhältnis von Direktabflussvolumen eines Ereignisses und dem zugehörigen Niederschlag (aus Merz und Blöschl 2008a)

BOX 5.9: Kalibrierung auf Basis beobachteter Abflussereignisse

Bei der Kalibrierung auf Basis beobachteter Abflussereignisse sollte das Modell nach Möglichkeit auch an extremen Abflussereignissen kalibriert werden. Ist dies nicht möglich, sollten die Modellparameter aus Beobachtungen hydrologisch ähnlicher Gebiete abgeleitet werden. Die aus den Abflussdaten ermittelten Veränderungen der Modellparameter mit der Größe des Ereignisses sind zu dokumentieren und die Wahl der Parameter für die Bemessungssituation ist zu begründen. Die Annahme von maximierten Modellparametern ist nicht zu empfehlen, sondern von Parametern, die näherungsweise bei vorgegebener Jährlichkeit des Niederschlags zur gleichen Jährlichkeit des Abflussscheitels führen. Eine regionale Zusammenschau der Analyseergebnisse ist für die Wahl der N-A-Parameter sehr hilfreich.

(c) Ermittlung der Modellparameter aus Gebietskenngrößen (a priori)

Wenn im betrachteten Einzugsgebiet keine Abflussdaten für die Kalibrierung zur Verfügung stehen – wie dies oft in kleinen Einzugsgebieten der Fall ist –, sind alternative Methoden erforderlich. Entsprechend Kapitel 4.5. ist die Kombination einer regionalen Übertragung aus vergleichbaren Gebieten mit Abflussdaten sowie Zusatzinformationen zum Prozessverständnis, insbesondere aus Gebietskenngrößen und Feldbegehungen, zu verwenden. Für die Ermittlung der HQ_n ist dabei besonders der Übergang von kleinen/mittleren auf große Ereignisse zu betrachten, zu dokumentieren und zu begründen (siehe Kapitel 8., Synthesebeispiele Weerbach, Rumpelbach).

Als Beispiele für Modellparameter aus Gebietskenngrößen zeigt Abb. 5.18a den Oberflächenabflussbeiwert als Standortparameter aus einer Kartierung nach Markart et al. (2004). Anhand der Beurteilung von Vegetation, Boden und Landnutzung wurde im Zuge der Geländebegehung den hydrologischen Reaktionseinheiten der zu erwartende Abflussbeiwert in Abflusskonstanz für ein Starkregenereignis der Intensität von 100 mm/h zugewiesen. Dem gegenübergestellt zeigt Abb. 5.18b einen Ausschnitt der Karte der Oberflächenabflussdisposition aus der Regionalisierung hydrologischer Bodenkenndaten für die Böden Niederösterreichs (HydroBod NÖ, Eder et al. 2011; siehe auch Kapitel 2.4.4. und 4.3.3.). Im Unterschied zur Abflussbeiwertkarte, die auf Grundlage von Felderhebungen generiert wird, ist die Abflussdispositionskarte aus Gebietseigenschaften sowie digitalen Karten des Geländes, Landnutzung, Böden und Geologie regional abgeleitet. Unterschiedliche Regenszenarien erzeugen im Modell unterschiedliche Abflussdispositionskarten. Dargestellt ist in Abb. 5.18b ein Starkregenereignis für kleine Gebiete bei kurzer Regendauer $D = 60$ min, Jährlichkeit = 100 Jahre, mit zusätzlich modellierter Verschlammungsneigung. Die dargestellten Modellparameter finden beispielsweise im Ereignismodell ZEMOKOST zur Ermittlung von Hochwasserkennwerten Verwendung. Unter Verwendung von Bemessungsniederschlägen unterschiedlicher Dauer (siehe Kapitel 2.2.3. und Abb. 5.8) und Modellparametern aus Gebietskenngrößen werden HQ_n -Werte und die zugehörige Wellenform mittels Ereignismodellierungen ermittelt.

Da als Ausgangspunkt für die Jährlichkeit des Abflusses jene des Niederschlags herangezogen wird, ist darauf zu achten, in der Ereignismodellierung die Eingangsgrößen und Modellparameter nicht zu maximieren, da ungünstige Kombinationen geringere Auftretenswahrscheinlichkeiten haben.

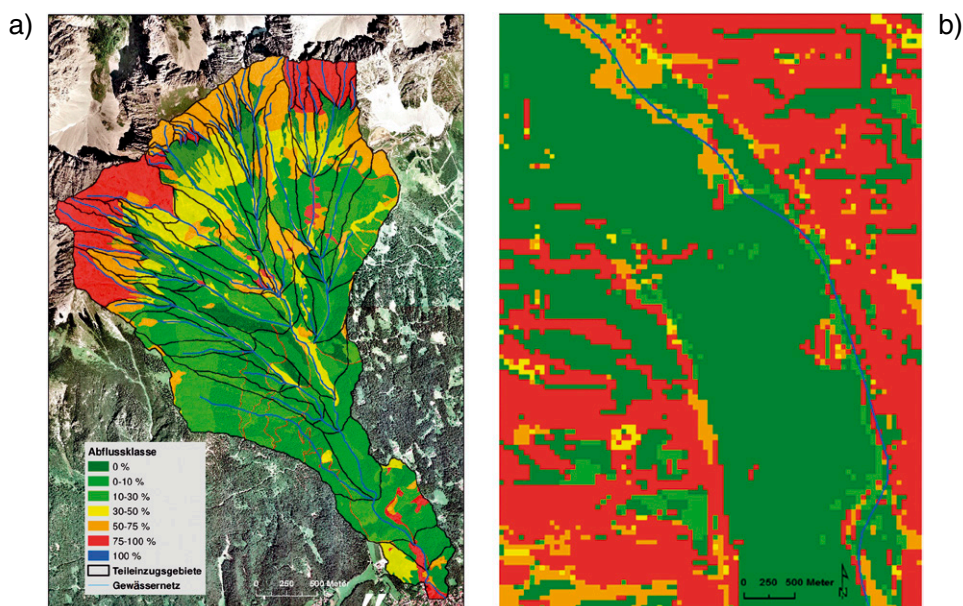


Abb. 5.18 (a) Oberflächenabflussbeiwertkarte im Gebiet des Höttinger Bachs, Tirol (Geländeaufnahme nach Markart et al. 2004), (b) Oberflächenabflussdisposition der Regionalisierung hydrologischer Bodenkenndaten HydroBod NÖ, Ausschnitt Einzugsgebiet Kreisbach, Wilhelmsburg (Legende wie links)

Das Ergebnis der N-A-Berechnung ist, wie in Kapitel 5.2. beschrieben, auf Plausibilität zu prüfen. Hierzu ist eine Mehrfachstrategie mithilfe unterschiedlicher Indikatoren (Chronik, Nachrechnung dokumentierter Ereignisse, „stumme Zeugen“ – Nachrechnung beobachteter Anschlaglinien, regionale Abflussstatistik, Vergleich mit empirischen Faustformeln) zur Plausibilisierung des Hochwassererwartungswerts zu empfehlen.

BOX 5.10: Ermittlung der Modellparameter aus Gebietskenngrößen (a priori)

Bei der Ermittlung der Modellparameter ohne Abflussmessungen im Gebiet sind diese wo möglich aus Abflussdaten vergleichbarer Gebiete der Umgebung zu übertragen, und/oder mit Prozessinformationen aus Gebietsbegehungen zu bestimmen. Je kleiner die Gebiete, desto mehr Gewicht kommt den Gebietsbegehungen und der Gebietskenntnis zu. Eine Maximierung der Parameter in Hinblick auf größtmögliche Scheitelabflüsse ist zu vermeiden, da ungünstige Parameterkombinationen geringere Auftretenswahrscheinlichkeiten haben. Verschiedene Verfahren sollten betrachtet und eine Plausibilisierung der Ergebnisse sollte vorgenommen werden.

5.3.4. HQ_n -spezifische regionale Einordnung der Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Ziel der Einordnung der Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung in den regionalen Kontext ist eine zusätzliche Überprüfung der Plausibilität. Entscheidend für genaue Ergebnisse ist, dass möglichst große und unterschiedliche Hochwässer zur Kalibrierung zur Verfügung stehen, die Datenlage (Niederschlag, Abfluss etc.) gut erfasst wurde und die Unterschiede zwischen Gebieten zutreffend berücksichtigt werden. Zum Beispiel sind die Abflussbeiwerte eines sehr großen, langen Niederschlag-Abfluss-Ereignisses (über 48 h) in einem großen, langsam reagierenden Gebiet nicht unbedingt maßgebend für HQ_n in kleinen, schnell reagierenden Gebieten. Deshalb ist es auch wichtig, kleine Gebiete für den regionalen Vergleich heranzuziehen, auch wenn sie nicht in unmittelbarer Nähe des Zielgebiets liegen. Diagramme mit der Darstellung der HQ_n - und Ereignisscheitelwerte, Gebietsfaktoren in Anlehnung an die Wundt-Formel, Regendauern, Direktabflussvolumen, Konzentrationszeiten und der Abflussbeiwerte aus der Modellrechnung und verschiedenen Ereignisauswertungen in der Region sind hilfreich für die Einschätzung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse und für die gebietsspezifische Übertragung der Eingangswerte und Parameter von beobachteten Einzugsgebieten in unbeobachtete Gebiete (siehe auch Kapitel 2.3.4. Lokale und regionale Abflussstatistik).

Abb. 5.19 zeigt als Beispiel einen Vergleich der HQ_{100} -Spenden von statistischen Pegelauswertungen, Einzelereignissen und dem Ergebnis des Niederschlag-Abfluss-Modells für das Synthesebeispiel Pram (siehe Kapitel 8.). In allen Pegel Einzugsgebieten stimmt das simulierte HQ_{100} mit dem HQ_{100} aus der Pegelstatistik überein, da der Bemessungsniederschlag so gewählt wurde, dass die Abflüsse die Erwartungswerte HQ_{100} möglichst gut abbilden. Für das größte Pegel Einzugsgebiet (Pramerdorf, 341 km²) entspricht das simulierte HQ_{100} in etwa dem Scheitelabfluss beim Hochwasser 2002 (größter beobachteter Abflussscheitel), ebenso im Gebiet Pram (14,2 km²). Im Gebiet Winertsham (130 km²) liegt das simulierte HQ_{100} unter dem Scheitelabfluss beim Hochwasser 2002, der Pegel Winertsham ist aber nicht ganz zuverlässig. Sowohl Simulation als auch Beobachtung zeigen eine Abnahme der Spende mit der Fläche entsprechend einem Exponenten von ca. 0.4 (statistisch kalibrierte Wundt-Beziehung $HQ_{100} = 6,9 * A^{-0,4}$, strichlierte Linie).

Der Gesamtabflussbeiwert als Abflussfracht/Regenfracht (Abb. 5.20) wurde für das Ereignis 2002 aus den beobachteten Hochwasserwellen ermittelt, die etwa 24 Stunden gedauert haben. Für den Bemessungsfall HQ_{100} wurde ein 9-stündiges Regenereignis verwendet, weil dessen Abflussscheitel eine gute Übereinstimmung mit den Erwartungswerten der Pegel zeigten. Für die Pegel ergaben sich aufgrund der kürzeren Ereignisdauer Gesamtabflussbeiwerte, die unterhalb denen des Ereignisses 2002 liegen. Die Verwendung der Welle aus dem 9-Stunden-Regen bedeutet eine praktikable Rechendauer für die instationäre Berechnung mit dem

2D-Strömungsmodell für den Gefahrenzonenplan. Sowohl Simulation als auch Beobachtung zeigen eine Abnahme der Spende mit der Fläche.

In Abb. 5.21 wurden die Spenden der Hochwasserscheitel und die dazugehörigen Direktabflussvolumina beobachteter Ereignisse und der Modellrechnung aufgetragen. Daraus sind die Größenordnungen der Direktabflussvolumina im regionalen Kontext gut erkennbar. Im Fall der Pram stand das Volumen nicht maßgeblich im Vordergrund. In Abstimmung mit dem Hydrographischen Dienst Oberösterreich wurden HQ_{100} -Wellen mit Regendauern entsprechend der Konzentrationszeit – und nicht der Regendauer des Extremereignisses 2002 – modelliert.

Eine andere Möglichkeit ist die Darstellung der Beziehung Direktabflussvolumen geteilt durch den Abflussscheitel (Abb. 5.22). Sie zeigt ebenfalls in ähnlicher Weise wie Abb. 5.21, dass die simulierten Wellen für das HQ_{100} durchwegs wesentlich schlanker sind als beim Hochwasser 2002. Im Ereigniskontext erkennt man, dass viele große Hochwässer im Pramgebiet auch durch kürzere Ereignisse hervorgerufen werden können, die für die als Projektziel vorgegebene Gefahrenzonenplanung in dem Fall von Interesse waren.

Ingesamt liegt der Wert der regionalen Einordnung darin, dass – falls Abweichungen zu den Nachbargebieten auftreten – diese auf Basis der Prozessursachen zu begründen sind.

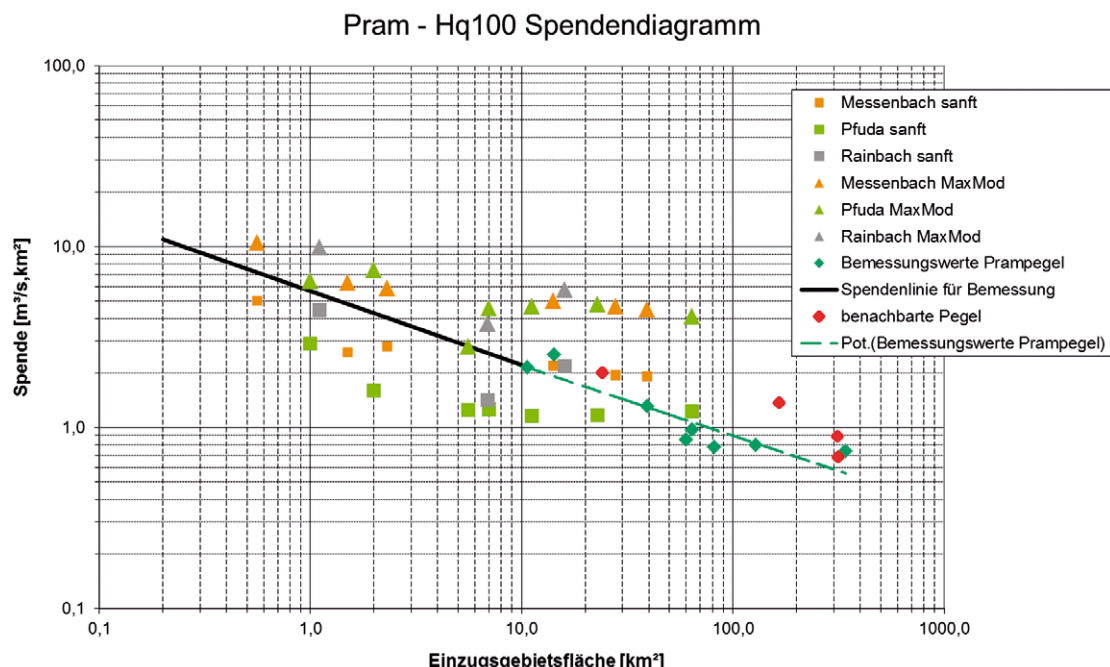


Abb. 5.19 HQ_n -spezifische regionale Einordnung der HQ_{100} -Abflussspenden gezeigt anhand des Synthesebeispiels Pram (siehe Kapitel 8.). Quadrate: mittlerer Bemessungsniederschlag mit sanfter Flächenabminderung, Dreiecke: MaxMod-Niederschlag ohne Flächenabminderung. Die Ergebnisse des Niederschlag-Abfluss-Modells mit räumlich differenziertem Niederschlag sind konsistent mit der regionalen Hochwasserstatistik

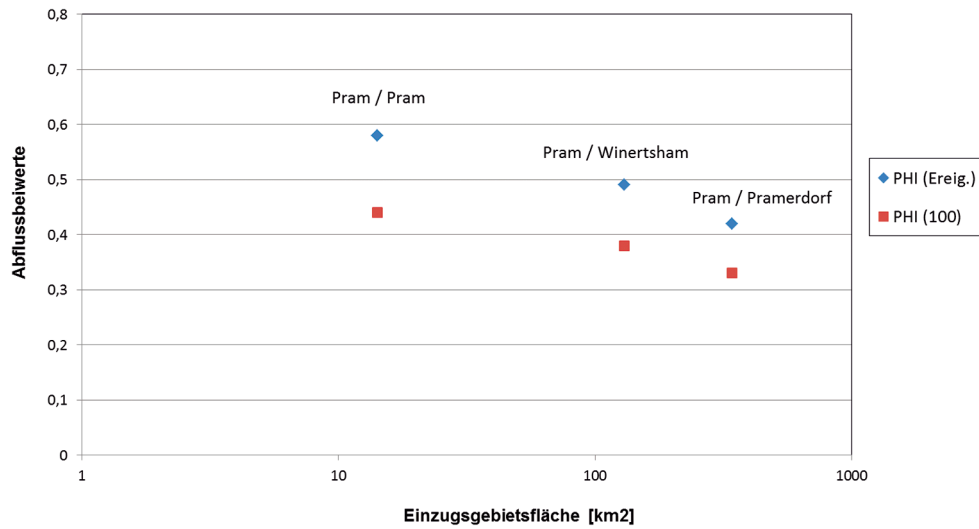


Abb. 5.20 Abflussbeiwerte des Synthesebeispiels Pram (siehe Kapitel 8.) aufgetragen gegen die Einzugsgebietsfläche. Blaue Karos: Abflussbeiwerte des Ereignisses im August 2002, braune Quadrate: Abflussbeiwerte entsprechend den HQ_{100} in Abb. 5.19

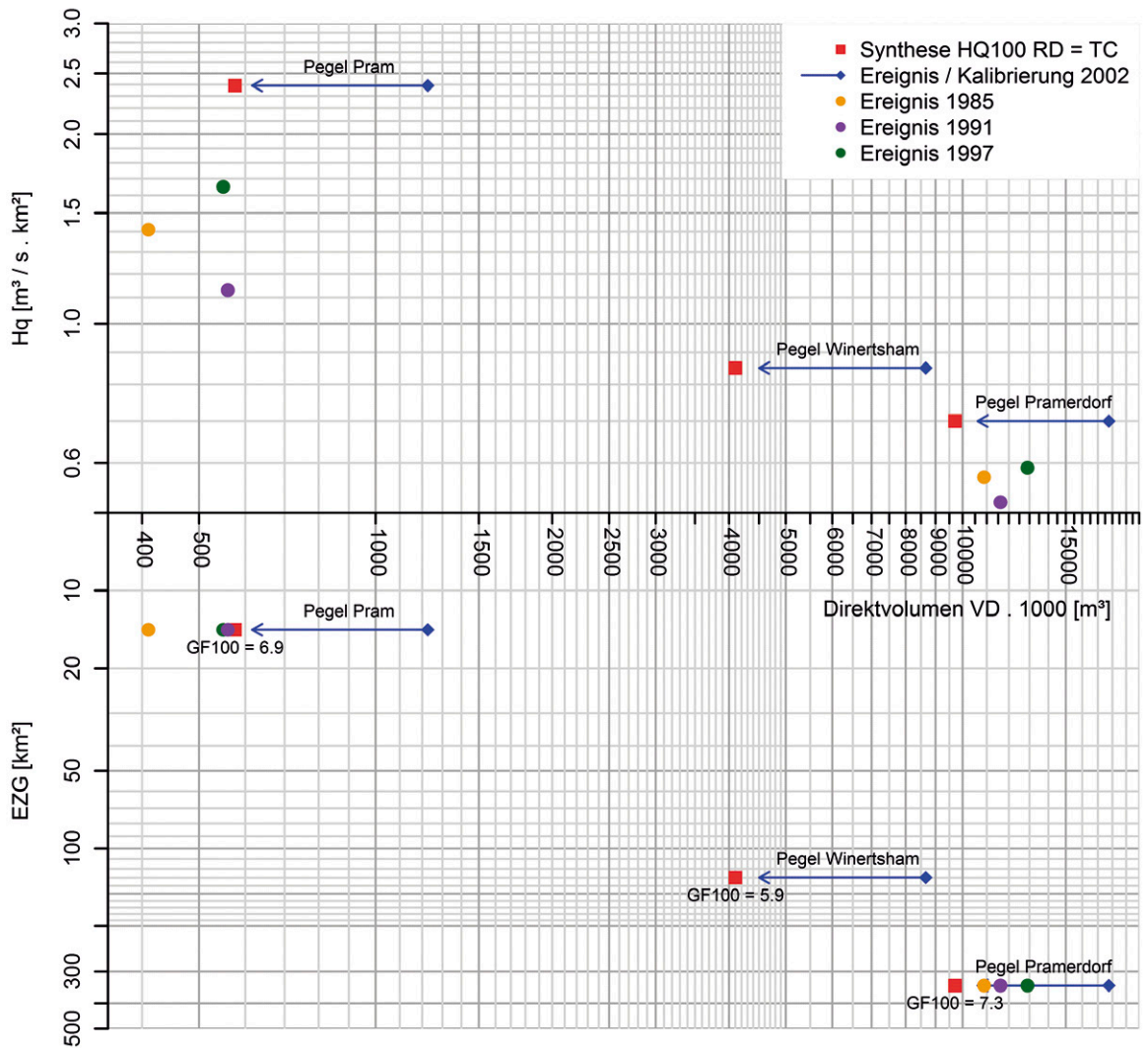


Abb. 5.21 Abflussscheitelspende, Direktabflussvolumen und Einzugsgebietsfläche für das Synthesebeispiel Pram (siehe Kapitel 8.)

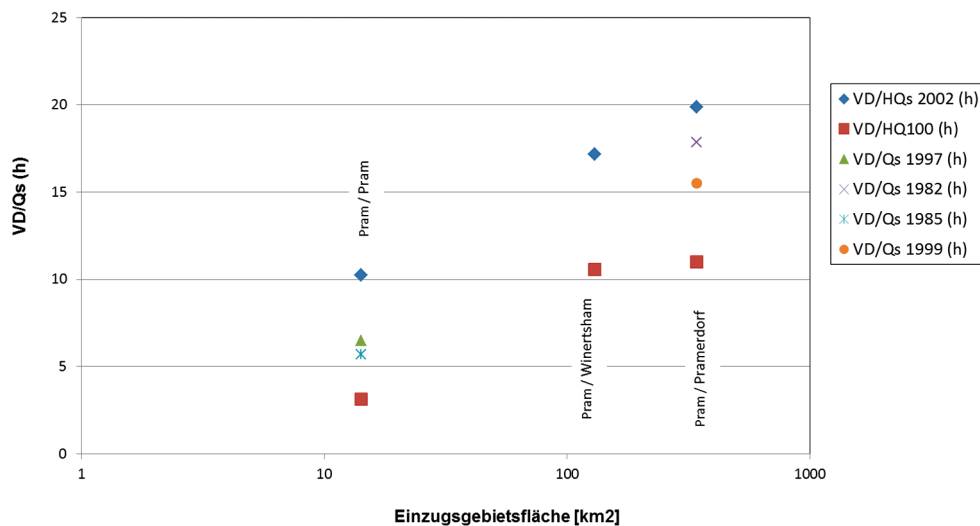


Abb. 5.22 Verhältnis Direktabflussvolumen VD zu Spitzenabfluss Q_s und Einzugsgebietsfläche für das Synthesebeispiel Pram (siehe Kapitel 8.)

BOX 5.11: Regionale Einordnung der Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Es wird empfohlen, HQ_n und Modellparameter im Vergleich zu den beobachteten Werten an mehreren Pegeln bzw. Einzelereignissen regional einzuordnen. Dabei ist insbesondere darauf zu achten, wie repräsentativ die Kalibrierung und die Parameter für die Anwendung des Modells im Vergleich zu beobachteten Ereignissen sind.

5.4. Modellanwendung auf Aufgabenstellung

Sobald die Eingangsdaten aufbereitet sind, die Modellstruktur gewählt, die Parameter festgelegt und das Modell mit diesen Parametern validiert und plausibilisiert ist, ist es bereit für die Anwendung. Die wichtigsten Anwendungsfälle sind:

- **Hochwasserbemessung:** Die häufigste Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen sind Bemessungsfälle für Hochwässer, etwa zum Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Gerinnestrecken und Hochwasserentlastungsanlagen sowie zur Dimensionierung von Hochwasserrückhaltebecken. In der Regel ist ein Scheitelabfluss vorgegebener Jährlichkeit (HQ_n) erforderlich sowie Hochwasserwellen, um die Retentionswirkung eines Beckens ermitteln zu können. Entsprechend sind die zu simulierenden Szenarien, etwa das HQ_{100} sowie größere Jährlichkeiten (z. B. HQ_{5000}), die durch Vorgabe der entsprechenden Niederschläge bestimmt werden. Für die Dimensionierung des Kanalnetzes und der Mischwasserüberläufe sind kleinere Jährlichkeiten erforderlich.
- **Wasserbewirtschaftung:** Für Fragen der Wasserdargebotsabschätzung, Gewässerschutz und Speicherwirtschaft werden in der Regel kontinuierliche Wasserhaushaltsmodelle mit einer zeitlichen Auflösung von Monaten oder Tagen verwendet. Eine typische Fragestellung ist die Auswirkung einer wasserwirtschaftlichen Anlage (Überleitung, Speicherung) auf den Wasserhaushalt, einschließlich Niederwasser, im Gerinne. Mit diesen Simulationen können Bewirtschaftungspläne abgeleitet und optimiert werden. Entsprechende Betriebsregeln müssen mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell gekoppelt werden.
- **Abflussvorhersage:** Modelle der Abflussvorhersage in Echtzeit (Hochwasser, Niederwasser, Wasserkraft) sind heute meist kontinuierlich unter Verwendung von Niederschlagsprognosen und Ensembles zur Abschätzung der Prognoseunsicherheit. Für die Nutzer solcher Prognosesysteme ist die Kenntnis des Modellierungsablaufs zur Abschätzung der Zuverlässigkeit der Prognosen wichtig.
- **Risikoanalyse:** Die Anwendungen der Hochwasserrisikoanalyse sind ähnlich denen der Hochwasserbemessung, jedoch geht es nicht um die Auslegung von Bauwerken oder

Maßnahmen, sondern um die Berechnung der Wahrscheinlichkeit von Überflutungen und der zugehörigen Schäden. Entsprechend ist die Berechnung des Scheitelabflusses vorgegebener Jährlichkeit (HQ_n) und meist der zugehörigen Welle zur Berücksichtigung von Retention erforderlich.

- Analyse von Veränderungen: Die Auswirkung von Veränderungen auf das Abflussregime kann mit kontinuierlichen Modellen oder Ereignismodellen analysiert werden, je nachdem, ob die Bodenfeuchte dabei eine zentrale Rolle spielt oder nicht. Die Auswirkungen werden durch Anwendung unterschiedlicher Szenarien (mit/ohne wasserbauliche/n Maßnahmen), geänderte Modellparameter zufolge geänderter Landnutzung, geänderter Niederschlag/Lufttemperatur (entsprechend einem Klimawandelszenario) berücksichtigt.
- Grundlage für die Modellierung des Stofftransports: Da hier Teilchengeschwindigkeiten erforderlich sind, kommen vor allem prozessnahe Modelle auf Basis von Massen- und Impulserhaltung zur Anwendung. Die Modelle können zur Nachrechnung beobachteter Ereignisse oder für Zukunftsszenarien (z. B. veränderte Landnutzung) herangezogen werden.
- Prozessverständnis: Es handelt sich hier um einen breiten Bereich von Anwendungen, bei dem vor allem prozessnahe Modelle zur Anwendung kommen. Beobachtete Ereignisse werden nachgerechnet und Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Rolle einzelner Teilprozesse in der Niederschlag-Abfluss-Transformation unter den speziellen Bedingungen des Untersuchungsgebiets besser zu verstehen.

BOX 5.12: Modellanwendung

Es wird empfohlen, die Modellanwendung auf die Aufgabenstellung abzustimmen. Verschiedene Szenarien bzw. Lastfälle sind so zu wählen, dass die Fragestellung vollinhaltlich beantwortet und nachvollzogen werden kann. Alle Annahmen betreffend Szenarien bzw. Lastfälle sind zu begründen und offenzulegen

6. Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse

6.1. Beurteilung der Unsicherheiten der Ergebnisse

6.1.1. Typen von Unsicherheiten

Für viele Aufgabenstellungen der Niederschlag-Abfluss-Modellierung (Kapitel 5.4.) ist oft nicht nur das Ergebnis als Zahlenwert von Interesse (z. B. das HQ_{100} oder die prozentuale Änderung der Wasserbilanz), sondern auch

- die Größe der Unsicherheiten dieses Ergebnisses und
- eine argumentative Begründung, warum sich das Ergebnis in dieser Weise darstellt.

Für beide Fragen ist es wichtig, die Unsicherheiten des Ergebnisses zu verstehen. Die Unsicherheiten können im Wesentlichen aus drei Quellen entstehen:

(a) Unsicherheiten zufolge Daten: Messfehler etwa in den Niederschlagsdaten und den Abflussdaten (siehe Kap. 2.2.2. und 2.3.2.) und Interpolationsfehler (siehe Kap. 2.2.5.) bewirken Unsicherheiten in den Modellergebnissen (Kleidorfer et al. 2009). Bei den Messfehlern sind zufällige Fehler (z. B. bei der Messung des Wasserstands, Niederschlagsmessung mittels Radar) von systematischen Fehlern (z. B. bei der Messung des Niederschlags, besonders des Schneeniederschlags; falscher Pegelschlüssel z. B. zufolge Eintiefung des Flussbetts; zu kleiner Scheitelabfluss, wenn große Beobachtungsintervalle vorliegen) zu unterscheiden (ÖNORM 2007; ISO 2008). Bei Wasserbilanzmodellen wirken sich systematische Fehler oft stärker aus als zufällige Fehler. Wird beispielsweise der gemessene Schneeniederschlag systematisch unterschätzt, bilanziert das Modell zu wenig Schneevorrat und im Modell schmilzt die Schneedecke zu früh ab. Wenn hingegen etwa die Lufttemperatur manchmal überschätzt und unterschätzt wird, können sich die positiven und negativen Einflüsse teilweise ausgleichen und insgesamt ist der Fehler für die Schneesimulation auf der saisonalen Skala geringer. Ähnliches gilt für die Simulation der Bodenfeuchte, die ebenfalls bilanziert wird. In diesen beiden Fällen wird das Gedächtnis des Fehlers gelöscht, wenn die Schneedecke (in der Natur und im Modell) abgeschmolzen ist bzw. die Bodenfeuchte (in der Natur und im Modell) Sättigung erreicht hat. Es werden wieder korrekte Startbedingungen für die Bilanzierung erreicht. Systematische Messfehler können durch die Kalibrierung bis zu einem gewissen Grad ausgeglichen werden. Manche Modelle besitzen eigene Korrekturfaktoren für den systematischen Messfehler des Schneeniederschlags (SCF, siehe Kapitel 3.3.1.), aber auch andere Messfehler können durch die Kalibrierung teilweise kompensiert werden. Echtzeitmodelle für die Abflussprognose (siehe Kapitel 2.2.6.) besitzen Nachführalgorithmen, die darauf abzielen, den Einfluss sich ändernder Fehler möglichst klein zu halten (Komma et al. 2008). Trotz dieser Kompensierungsmaßnahmen sollte immer getrachtet werden, die Messfehler für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung möglichst gering zu halten.

(b) Unsicherheiten zufolge Modellstruktur: Diese Unsicherheiten treten durch Vereinfachung der Realität im Modell bzw. durch nur ungenügend abgebildete Prozesse auf. Ein typisches Beispiel ist der Makroporenabfluss, der in verschiedenen Modellen unterschiedlich abgebildet ist. In manchen Gebieten tritt ein Bypass-Fluss auf, also eine rasche Infiltration durch den Boden in das Grundwasser. Wenn das verwendete Modell diesen Prozess nicht abbildet, werden die Bodenfeuchte und die rasche Abflusskomponente überschätzt. Auch das Ausmaß der Nichtlinearität von Abflussbildung und Abflusskonzentration beim Übergang von kleinen auf große Ereignisse ist eine typische Eigenschaft der Modellstruktur (Vigione et al. 2018). Die in Kapitel 4. und 5. empfohlenen Vorgangsweisen der Prozessargumentation und der Verwendung eines Portfolios von Informationen kann dazu beitragen, eine möglichst geeignete Modellstruktur für die jeweilige Fragestellung und das betreffende Gebiet auszuwählen, um damit die Modellstrukturunsicherheiten möglichst klein zu halten. In sehr kleinen Einzugsgebieten kann der Bruch von Verklausungen (z. B. durch Äste, seitlich einströmende Muren) im Gerinnequerschnitt einen Schwall erzeugen, der in ungünstigen Fällen bis zum Doppelten des HQ_{100} betragen kann. In manchen Flüssen kann die Bildung einer geschlossenen Eisdecke

im Winter in Verbindung mit einem raschen Temperaturanstieg und Abflusshindernissen zu Eisstößen führen, wodurch es zu einem erheblichen Aufstau des Wassers kommen kann. Verklausungen und Eisstöße werden in der Regel nicht bei der Niederschlag-Abfluss-Modellierung, sondern bei den Sicherheiten in der wasserbaulichen Planung berücksichtigt.

(c) *Unsicherheiten infolge nicht optimaler Modellparameter:* Diese Unsicherheiten hängen sehr stark mit dem Ausmaß der Kalibrierung zusammen. Steht eine lange, zuverlässige Reihe von Abflussdaten im betreffenden Gebiet mit den zugehörigen Niederschlägen zur Verfügung (einschließlich großer Ereignisse), kann die Kalibrierung der Modellparameter mit großer Zuverlässigkeit erfolgen. Überparametrisierung, die zum Overfitting führt, kann allerdings auch hier die Optimalität der Parameter einschränken (siehe Kapitel 4.4.5. und 5.1.3.). Ist nur eine kurze Datenreihe verfügbar, sind die Parameter meist nicht optimal, und dies schlägt sich in Unsicherheiten der Ergebnisse der Modellierung nieder. Manchmal besitzen die Kalibrierungsdaten nicht die gleichen Eigenschaften wie die Eingangsdaten für die Modellanwendung (Bemessungsereignisse, Prognose etc.). Die Dateneigenschaften der Kalibrierung können sich von denen der Modellanwendung durch ihre Qualität (z. B. unterschiedliche Anzahl von Stationen, andere Stationen, Änderung der Fehlerkorrektur, Änderung der Messmethodik), und durch ihre hydrologischen Charakteristiken (z. B. unterschiedlich große Ereignisse und dadurch unterschiedliche Abflussreaktion, mehr/weniger Schnee, unterschiedliche Lufttemperaturen, Regen-auf-Schnee-Situationen, Anlage von Forststraßen) unterscheiden. In diesen Fällen ist ebenfalls mit nicht optimalen Modellparametern und damit Unsicherheiten in den Ergebnissen zu rechnen.

Abb. 6.1 zeigt ein Beispiel dieses Effekts. Es wurde ein kontinuierliches Niederschlag-Abfluss-Modell für 273 Einzugsgebiete in Österreich an Abflussdaten des Zeitraums 1976 – 1981 kalibriert, mit den so ermittelten Modellparametern täglicher Abfluss in diesen Gebieten simuliert, und schließlich wurden die Simulationen mit den beobachteten Abflüssen unterschiedlicher Jahre verglichen. Es zeigt sich (Abb. 6.1), dass die Fehler des simulierten Abflusses für die Periode 1976 – 1981 klein sind, in den späteren Jahren aber größer werden (im Fall von Niederwasser Q_{95} bis ca. 10 %, im Fall von Hochwasser Q_5 bis ca. 30 % im Mittel). Dies hängt damit zusammen, dass sich die späteren Jahre zunehmend mehr von der Kalibrierperiode 1976 – 1981 durch höhere Lufttemperaturen, größere Verdunstung und größeren Niederschlag unterscheiden (Duethmann und Blöschl 2018). Abb. 6.2 (unten) zeigt eine systematische Aus-

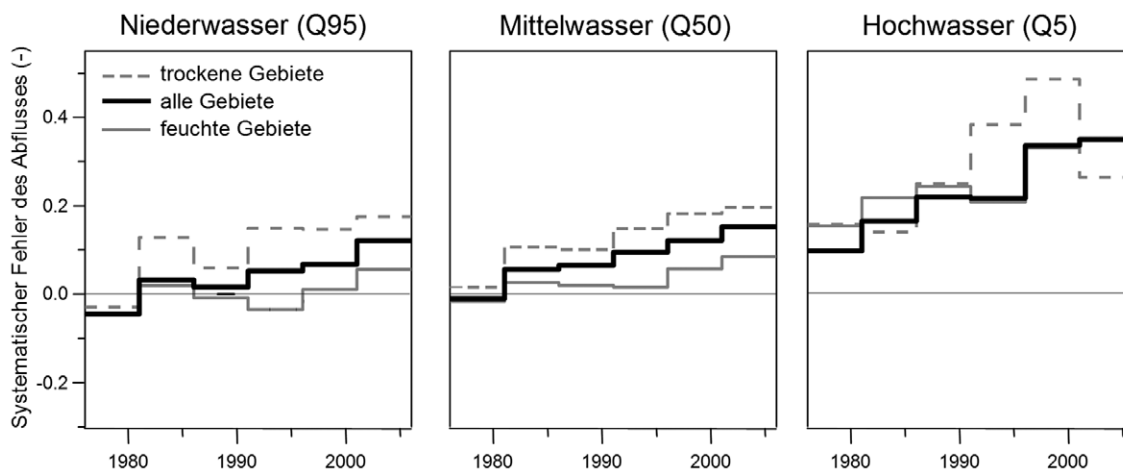


Abb. 6.1 Validierungsfehler $Dq = (Q_{sim} - Q_{beob}) / Q_{beob}$ von simulierten niedrigen (Q_{95}), mittleren (Q_{50}) und hohen (Q_5) Abflüssen für 5-Jahres-Perioden im Zeitraum 1976 und 2006 gemittelt über 273 österreichische Einzugsgebiete (dicke schwarze Linien): Die räumlichen Mittelwerte der feuchteren und trockeneren Einzugsgebiete sind als durchgezogene bzw. gestrichelte graue Linien dargestellt. Trockene Gebiete sind solche mit $PET / P > 0,35$. Feuchte Gebiete sind solche mit $PET / P < 0,60$, wobei PET die potenzielle Verdunstung und P der mittlere Jahresniederschlag ist. Die Modellparameter wurden für den Zeitraum 1976 – 1981 in den jeweiligen Gebieten unter Verwendung des HBV-Modells kalibriert (aus Merz und Blöschl 2011). Das Q_{95} ist der Durchfluss, der an 95 % der Tage im Jahr überschritten wird, das Q_5 der Durchfluss, der an 5 % der Tage im Jahr überschritten wird

wertung, nach der die absoluten Fehler in der Hälfte der Gebiete ($CDF = 0.5$) für Niederwasser Q_{95} von 7 % (Kalibrierungsperiode) auf 17 % (Validierungsperiode) bei einer Zeitverschiebung von 25 Jahren zwischen Kalibrierung und Validierung zunehmen. Für Hochwässer Q_5 steigen die entsprechenden Werte von 9 % auf 22 %. Das sind Unsicherheiten, mit denen auch bei Modellanwendungen zu rechnen ist, wenn sich der Kalibrierungszeitraum von der Zukunft, für die die Anwendung zutreffen soll, unterscheidet. Je weiter man in die Zukunft (oder die Vergangenheit) extrapoliert, desto größer werden die Simulationsfehler. Durch Einbeziehung von Zusatzinformation und Plausibilisierung (Kapitel 4.2.1. und 5.2.) können die Unsicherheiten wieder reduziert werden. Für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung bedeuten die Ergebnisse in Abb. 6.1 und 6.2, dass je näher der Anwendungszeitraum beim Kalibrierungszeitraum liegt, desto zuverlässigere Ergebnisse zu erwarten sind, falls langfristige Veränderungen vorliegen und der Fokus auf mittleren Verhältnissen liegt. Durchgeführte Niederschlag-Abfluss-Simulationen sind deshalb nicht für eine unbefristete Zeit in die Zukunft gültig. Für extreme Verhältnisse (einschließlich große Hochwässer) ist grundsätzlich ein längerer Kalibrierungszeitraum für die Zuverlässigkeit der Parameterschätzung günstig, insbesondere wenn unterschiedliche Situationen (kleine und große Ereignisse, feuchte und trockene Jahre etc.) in den Datenreihen enthalten sind.

Falls aufgrund fehlender Abflussdaten im betreffenden Einzugsgebiet (unbeobachtete Gebiete) keine Modellkalibrierung erfolgen kann, ist die Unsicherheit in der Parameterbestimmung groß. Kapitel 4.5. und 5.2. empfehlen entsprechende Vorgangsweisen, um dennoch tragfähige Ergebnisse zu erhalten. Werden die Modellparameter ausschließlich aus Nachbargebieten

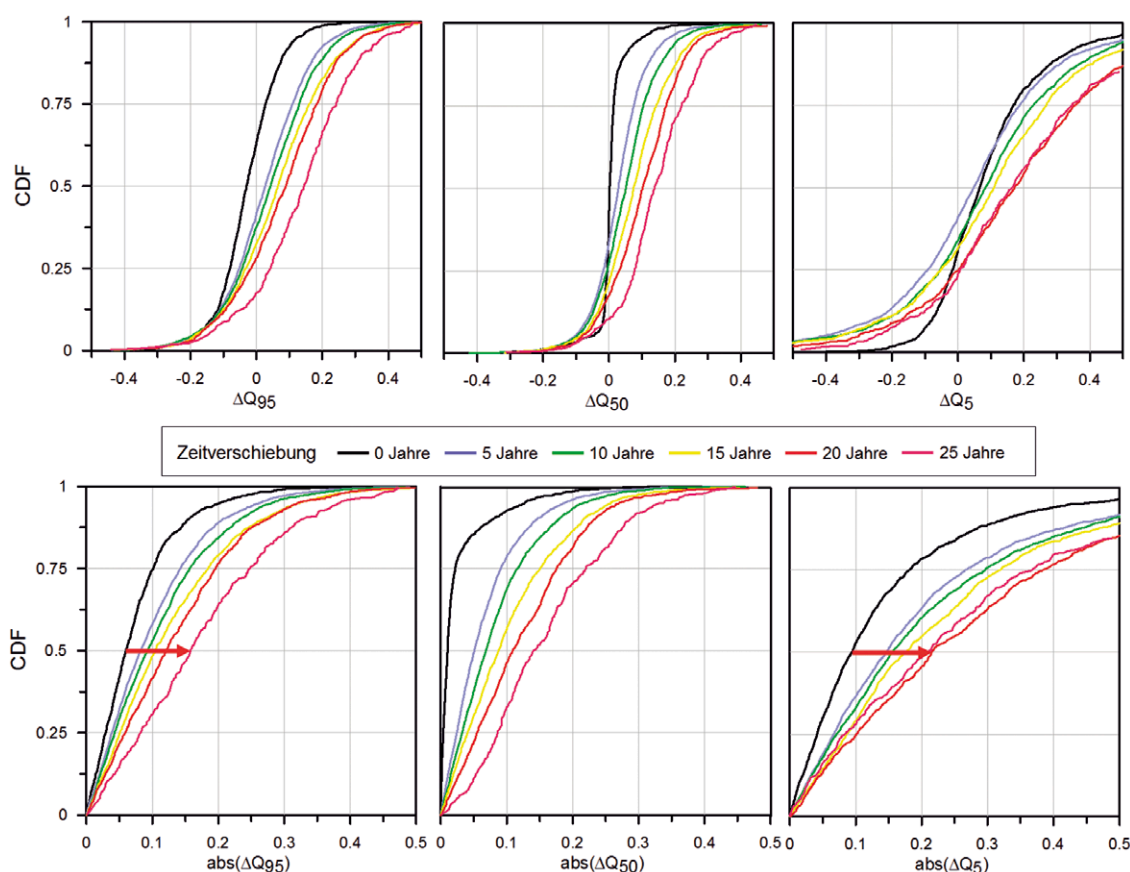


Abb. 6.2 Validierungsfehler von simulierten niedrigen (Q_{95}), mittleren (Q_{50}) und hohen (Q_5) Abflüssen für verschiedene 5-Jahres-Zeiträume, wenn Zeitstabilität der Parameter angenommen wird, aufgetragen als Summenhäufigkeitsverteilung über 273 österreichische Einzugsgebiete: Die Grafiken (oben) zeigen Fehler wie in Abb. 6.1, die Grafiken (unten) deren Absolutwerte. Kurvenparameter ist die Zeitverschiebung zwischen den Kalibrierungs- und den Validierungsperioden. Eine Zeitverschiebung von 0 entspricht den Kalibrierungsfehlern. Die roten Pfeile zeigen die Zunahme des Fehlers für die Hälfte der Gebiete mit der Zeitverschiebung. Unter Verwendung des HBV-Modells (aus Merz und Blöschl 2011)

übertragen (ohne Feldbegehung, ohne Prozessargumentation), stellt sich die Auswirkung der Parameterunsicherheit auf die Abflusssimulation wie in Abb. 6.3 dar. Bei der vergleichenden Studie wurde ein kontinuierliches Niederschlag-Abfluss-Modell für 320 Einzugsgebiete in Österreich an Abflussdaten kalibriert. Jeweils eines dieser Gebiete wurde als unbeobachtet angenommen und die Modellparameter wurden ausschließlich aus den kalibrierten Parametern der Nachbargebiete übertragen (ohne Verwendung der Abflussdaten im betreffenden Gebiet). Mit diesen Parametern wurde der Abfluss simuliert und mit den Beobachtungsdaten im betreffenden Gebiet verglichen. Die Simulationsgüte des Abflusses (Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE) in der Hälfte der Gebiete beträgt für den Kalibrierungszeitraum 0,72 und nimmt durch Regionalisierung auf ca. 0,65 ab (je nach Regionalisierungsmethode). Im Validierungszeitraum sinkt sie von 0,66 auf ca. 0,61. Zu bedenken ist allerdings, dass in manchen Gebieten (ganz links in der Grafik) die Güte noch viel stärker abnimmt, in anderen (ganz rechts in der Grafik) ist die Abnahme geringer. Zudem hängt die Güte, mit der in unbeobachteten Gebieten Abfluss simuliert werden kann, von der Größe des Gebiets (in größeren, unbeobachteten Gebieten kann der Abfluss genauer simuliert werden) und vom Klima ab (in den feuchten Gebieten im Westen Österreichs kann der Abfluss genauer simuliert werden als in den trockenen Gebieten im Osten Österreichs, jeweils für unbeobachtete Gebiete) (Abb. 6.4).

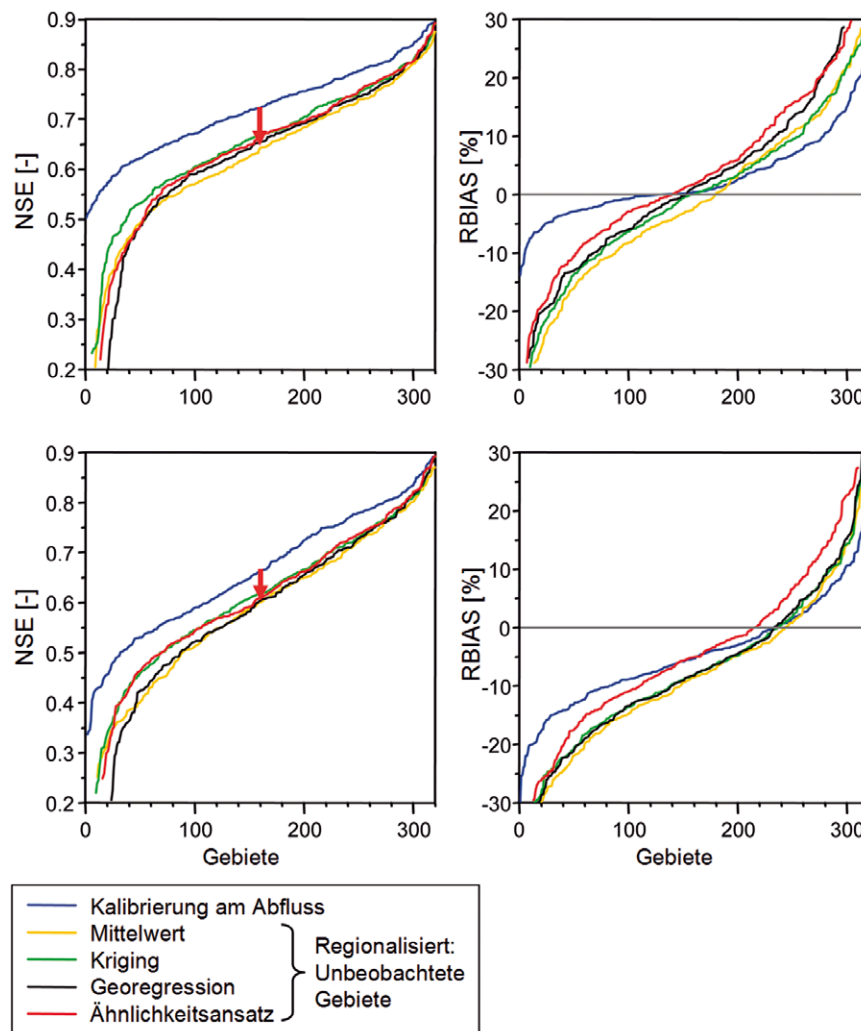


Abb. 6.3 Simulationsgüte des täglichen Abflusses (Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE, links) und mittlere Volumenfehler (d. h. Fehler des mittleren Jahresabflusses, RBIAS, rechts) in unbeobachteten Einzugsgebieten für verschiedene Parameter-Regionalisierungsmethoden, aufgetragen als Summenhäufigkeitsverteilung über 320 österreichische Einzugsgebiete: Die roten Pfeile zeigen die Abnahme der Simulationsgüte für die Hälfte der Gebiete, wenn die Modellparameter nicht kalibriert werden, sondern aus den Nachbargebieten übertragen werden. Kalibrierungsperiode (oben) und Validierungsperiode (unten). Unter Verwendung des HBV-Modells (aus Parajka et al. 2005b)

Schließlich können sich die drei Typen von Unsicherheiten (infolge von Messdaten, Modellstruktur, Modellparametern) gegenseitig beeinflussen. Messdaten mit großen Fehlern und eine ungeeignete Modellstruktur führen auch zu unpassenden bzw. unplausiblen Modellparametern. Umgekehrt helfen möglichst genaue Messdaten und eine geeignete Modellstruktur, zutreffende Modellparameter ermitteln zu können, mit dem die Aufgabenstellung in geeigneter Weise gelöst werden kann.

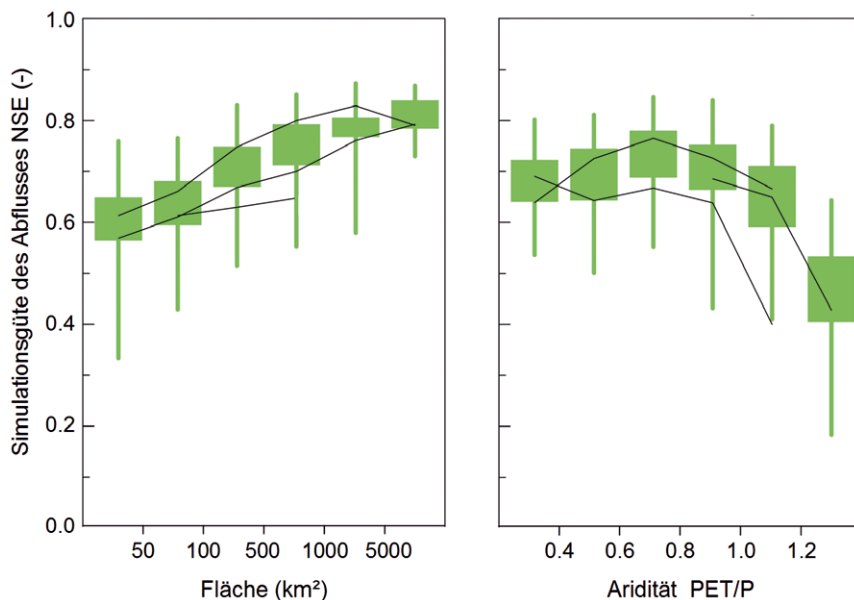


Abb. 6.4 Simulationsgüte des Abflusses (Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE) in unbeobachteten Einzugsgebieten. Regionalisierung der Parameter auf Basis möglichst ähnlicher Einzugsgebieteigenschaften: 1832 Einzugsgebiete in verschiedenen Ländern der Welt. Grüne Boxen sind die 40- bis 60%-Quantile verschiedener Gebiete, grüne senkrechte Linien sind die 20- bis 80%-Quantile. Schwarze Linien verbinden mittlere Effizienzen für die gleiche Region (aus Blöschl et al. 2013b)

6.1.2. Abschätzung der Unsicherheiten

Die wichtigsten Instrumente zur Abschätzung der Unsicherheiten sind:

- Validierung anhand von Abflussdaten,
- Plausibilisierung anhand zusätzlicher Informationen,
- Sensitivitätsanalysen und
- hydrologische Argumentation möglicher Unsicherheiten.

Die ersten beiden Methoden wurden in den Kapiteln 5.1. und 5.2. diskutiert. Eine hydrologische Argumentation ist immer anzustreben, aufbauend auf dem Prozessverständnis, der Kenntnis des Modells und dessen Eingangsdaten und einer Einschätzung des Bearbeiters der maßgebenden Unsicherheiten für den Anwendungsfall.

Sensitivitätsanalysen sind sinnvoll zur Ergänzung der anderen Methoden. Dabei können untersucht werden:

- die Sensitivität des Ergebnisses auf Eingangsdaten,
- die Sensitivität des Ergebnisses auf die Modellparameter und
- die jeweils damit zusammenhängenden Annahmen.

Sensitivitätsanalysen geben Auskunft darüber, wie sich die Ergebnisse des Modells bei Veränderung der Eingangsgrößen und Parameter in plausiblen Bandbreiten verändern und wo das Modell sehr empfindlich (mit großen Veränderungen in den Modellergebnissen) reagiert (Gamerith 2011). Die Sensitivität auf einen Parameter hängt dabei vom Wert des Parameters selbst, vom Wert der anderen Parameter und von den Eingangsdaten ab.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse helfen bei verschiedenen Aspekten der Modellierung:

- *Einfachere und effizientere Kalibrierung:* Die Kenntnis, wie das Modell auf Veränderungen reagiert, hilft dabei, rascher eine gute Modellkalibrierung zu erzielen. Allen Parametern, die bei kleiner Veränderung zu großen Änderungen in den Ergebnissen führen, ist besonderes Augenmerk zu schenken.
- *Beurteilung der Aussagequalität des kalibrierten Modells:* Viele Parameter können nur in Bandbreiten geschätzt werden. Durch die Sensitivitätsanalyse wird abgeschätzt, wie sich Modellergebnisse durch Variation dieser Parameter verändern. Dies ist besonders in Bereichen wichtig, wo keine Messdaten zur Modellkalibrierung vorliegen (z. B. Extremereignisse) oder die Messdaten ungenügend sind. Auch Eingangsdaten in das Modell, wie z. B. Durchflüsse, sind mit Messunsicherheiten behaftet.
- *Beurteilung der Aussagequalität von Variantenuntersuchungen:* Bei der Untersuchung von Maßnahmen im Untersuchungsgebiet wird das kalibrierte Modell mehr oder weniger stark verändert. Die Unsicherheiten in den Aussagen können dann mittels Sensitivitätsanalyse erfasst werden.

Eine lokale Sensitivitätsanalyse ermittelt die Sensitivität des Modellergebnisses auf einen Parameter (oder eine Eingangsgröße), wobei alle anderen Parameter (Eingangsgrößen) fix gehalten werden. Die Werte der anderen Parameter sollten möglichst nahe am erwarteten oder bereits kalibrierten Wert des Parameters liegen, ebenso sollten die anderen Eingangsgrößen möglichst nahe an den zu erwartenden liegen. Der Rechenaufwand bei lokalen Sensitivitätsanalysen ist relativ gering und es sind nur so viele zusätzliche Berechnungen notwendig, wie es Parameter (oder Varianten von Eingangsgrößen) im Modell gibt. Demgegenüber steht die globale Sensitivitätsanalyse, bei der alle Parameter (oder Varianten von Eingangsgrößen) gleichzeitig variiert werden. Sie ist zwar aussagekräftiger, besonders wenn das Niederschlag-Abfluss-Modell sehr nicht-linear ist und die Parameter untereinander korreliert sind, allerdings ist sie rechentechnisch und methodisch wesentlich aufwendiger (Gamerith 2011).

Eine lokale Sensitivitätsanalyse wird meist manuell durchgeführt. Hierbei wird der Wert für einen Parameter manuell geändert, der Abfluss mit diesem geänderten Parameter simuliert und dann das Ergebnis mit dem der Simulation mit dem ursprünglichen Parameter verglichen. Ebenso kann die Sensitivität auf Änderungen in den Eingangsdaten getestet werden, indem diese variiert werden. Werden die Änderungen in den Parametern entsprechend einer realistischen Unsicherheit in der Parameterbestimmung gewählt, lässt sich eine Abschätzung der zu erwartenden Unsicherheiten abgeben. Ebenso kann die Sensitivitätsanalyse für eine Szenarienanalyse herangezogen werden. Dabei werden vom Modellanwender basierend auf seinen Erfahrungen mit dem Modell, der Datengrundlage (Genauigkeit der Eingangsdaten, Art der Datenermittlung) und der Anwendungssituation bestimmte Kombinationen von Parametersätzen bzw. Eingangsdaten definiert. Diese können verschiedenen Annahmen entsprechend gewählt werden, z. B.:

- wahrscheinlichstes Szenario: Kombination, die erwartet wird;
- „worst case“-Szenario: Überlagerung ungünstiger Kombinationen (z. B. höchster Niederschlag, höchster Abflussbeiwert);
- „best case“-Szenario: Überlagerung günstiger Kombinationen.

Zusätzlich ist es auch möglich, Szenarien anhand von Prognosen für zukünftige Entwicklungen (z. B. Landnutzungsänderung, Klimawandel) zu erstellen (siehe Kapitel 4.6. und 5.4.), die oft ebenfalls den Charakter von Sensitivitätsanalysen haben.

Abb. 6.5 zeigt ein Beispiel der Szenarienanalyse mithilfe von manueller Sensitivitätsanalyse. Ein städtisches Einzugsgebiet in Tirol (siehe Sitzenfrey et al. 2015) hat eine Gesamtfläche von 21,9 ha, davon sind 11,8 ha befestigt (Befestigungsgrad BG = 53 %). Für ein gewähltes (gemessenes) Ereignis sind Niederschlagsdaten in 5-Minuten-Intervallen verfügbar. Die Dauer des Ereignisses beträgt ca. 2 Stunden (gesamtes Niederschlagsvolumen 20,4 mm), wobei die Intensitätsspitze des Ereignisses mit 6 mm Niederschlag innerhalb von 5 Minuten nach

20 Minuten auftritt. In der Simulation ergibt sich ein maximaler Abfluss von 2.105 l/s. In der Szenarienanalyse wird nun geprüft, wie sich die Änderung des Befestigungsgrads und damit der abflusswirksamen befestigten Fläche auf den Spitzenabfluss auswirkt.

- Szenario 1: Eine Abkoppelung von Flächenanteilen z. B. durch Versickerung (Reduktion des Befestigungsgrades auf 37 % bzw. der abflusswirksamen befestigten Fläche auf 8,2 ha) führt zu einem Spitzenabfluss von 1.465 l/s.
- Szenario 2: Eine fortschreitende Flächenversiegelung (Erhöhung des Befestigungsgrades auf 70 % bzw. der abflusswirksamen befestigten Fläche auf 15,4 ha) führt zu einem Spitzenabfluss von 2.637 l/s.

In gleicher Weise kann beispielsweise der Einfluss von (abgeschätzten) Unsicherheiten in der Flächenerhebung getestet werden.

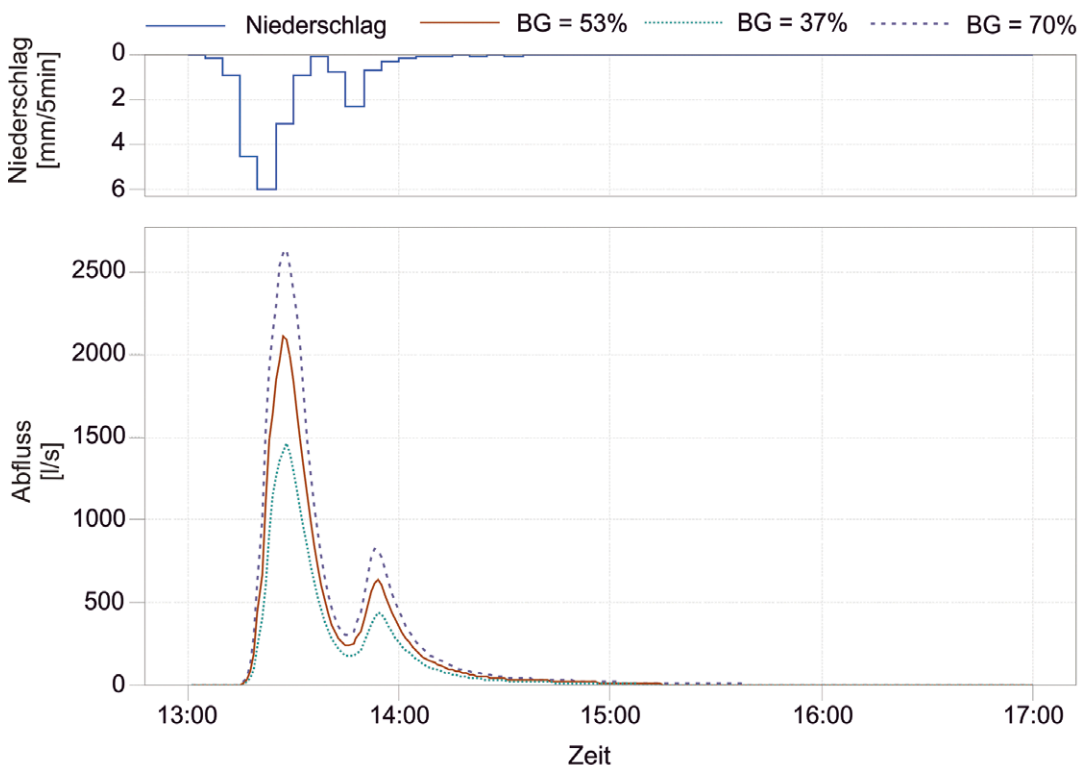


Abb. 6.5 Einfluss unterschiedlicher Parameter auf den Abfluss in einer Szenarienanalyse für ein städtisches Einzugsgebiet in Tirol mit einer Gesamtfläche von 21,9 ha

Zwei weitere Beispiele der Sensitivitätsanalyse sind in Abb. 6.6 und 6.7 dargestellt. Unterschiedliche Werte des Parameters FC (maximale Speicherfähigkeit des Bodens) im auf Hydrotopstruktur basierenden Modell KAMPUS (Blöschl et al. 2008a; Reszler et al. 2006b) wurden gewählt, indem in jedem Hydrotop der Wert FC in einer plausiblen Bandbreite variiert wurde. Der Parameter FC beeinflusst die Abflussbildung abhängig von der aktuellen Bodenfeuchte. Bei höheren Werten kommt es zu stärkeren Verlusten bzw. verringerten Direktabflusshöhen und zu einer verzögerten Abflussreaktion. Der Bodenspeicher muss erst aufgefüllt werden, d. h., es kommt zu einer Erhöhung der Bodenfeuchte, bis der Abfluss ansteigt. Das erste Beispiel zeigt das Hochwasser 2002 für den Zulauf in den Speicher Ottenstein, Waldviertel. Mit den verschiedenen Parametern wird eine Bandbreite für die Hochwasserspitze von 500 bis knapp über 600 m³/s simuliert. Die Bandbreite ist bei diesem extremen Ereignis relativ zum Scheitel gering (ca. 15 % des beobachteten Scheitels). Das zweite Beispiel ist das Ereignis im Juli 2005 am Pegel Zwettl/Bahnbrücke mit einer beobachteten Spitze von ca. 90 m³/s. Für dieses kleinere Ereignis ist die Bandbreite, relativ zur aufgetretenen Abflussspitze, wesentlich größer (ca. 30 % des beobachteten Scheitels). Die Empfindlichkeit dieses Parameters nimmt also mit der Ereignisgröße ab. Besteht die Aufgabenstellung darin, große Hochwässer zu berechnen, ist die mit der Wahl dieses Parameters eingetragene Unsicherheit relativ gering.

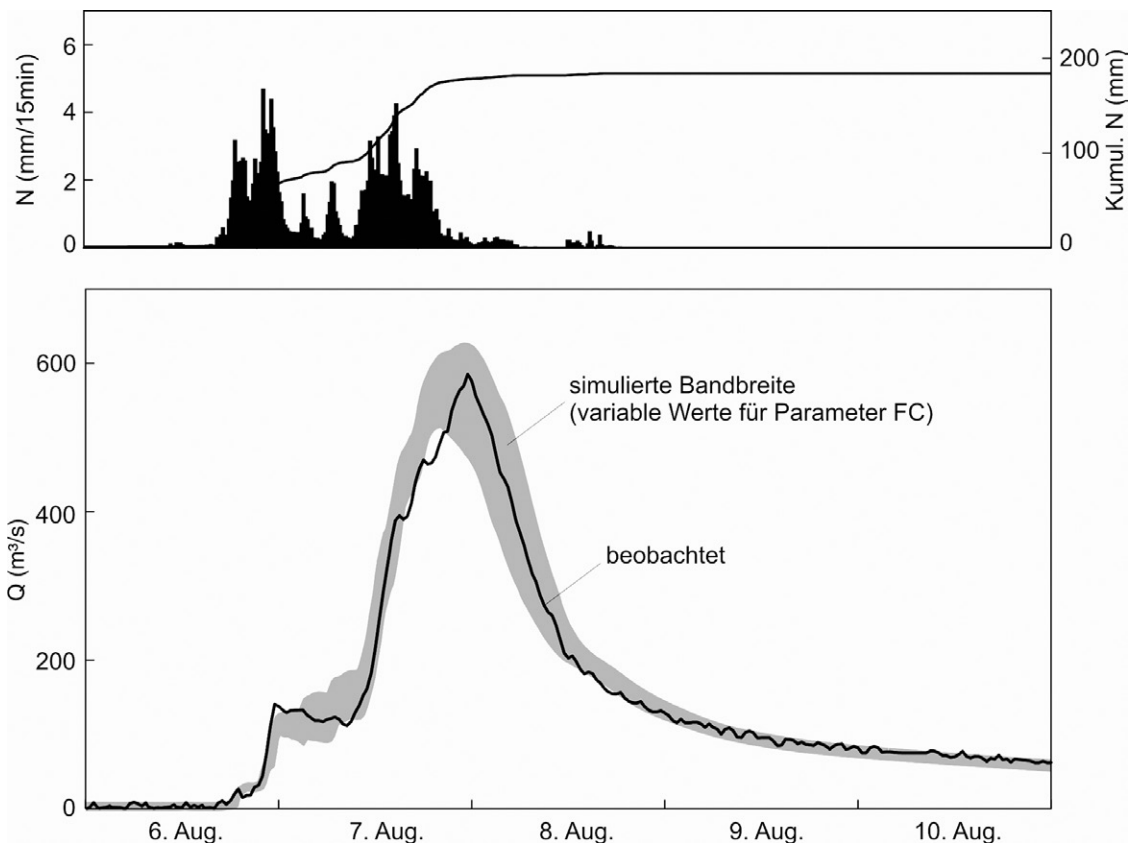


Abb. 6.6 Sensitivität des Abflusses auf Variation des Modellparameters FC: Hochwasser im August 2002 am Kamp – Zulauf in den Speicher Ottenstein (889 km²), Waldviertel

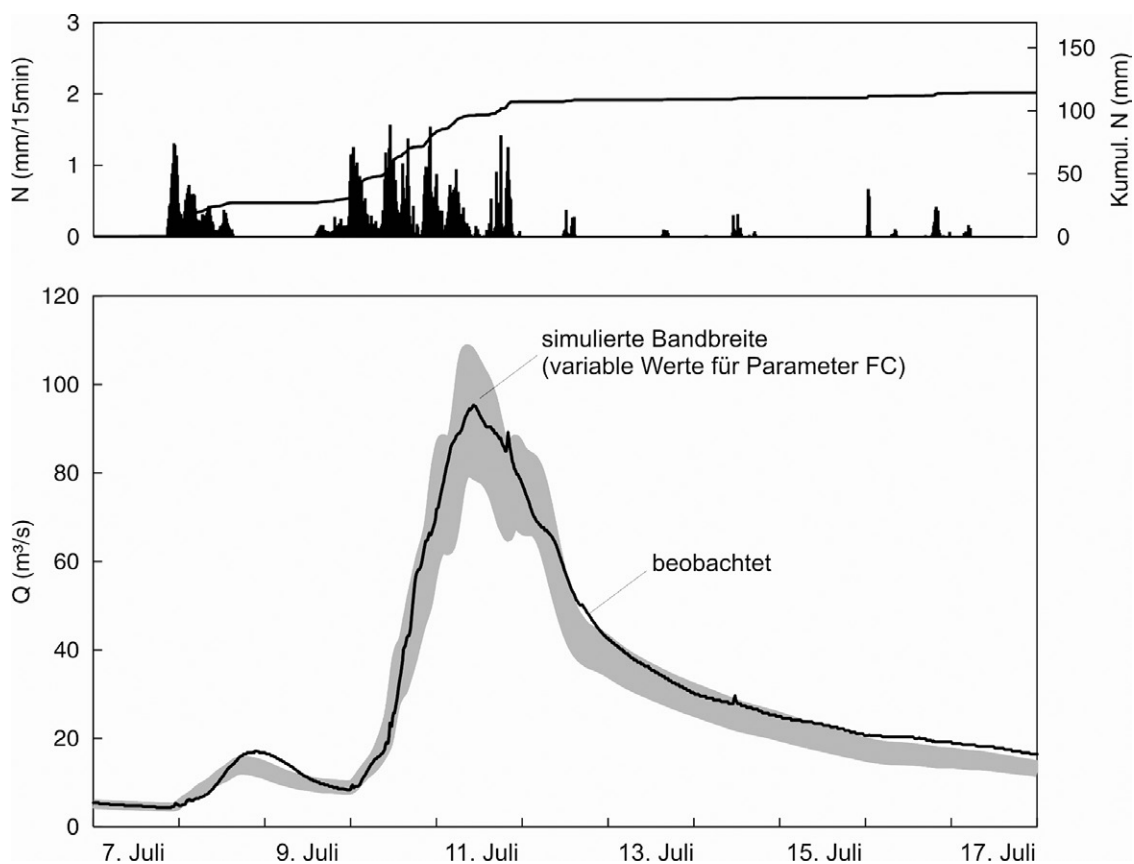


Abb. 6.7 Sensitivität des Abflusses auf Variation des Modellparameters FC: Hochwasser im Juli 2005 am Kamp – Pegel Zwettl/Bahnbrücke (622 km²), Waldviertel

BOX 6.1: Unsicherheiten und Sensitivitätsanalysen

Eine Untersuchung der Unsicherheiten eines Modells ist von großer Bedeutung zur Beurteilung der Qualität der Modellergebnisse und wird deswegen grundsätzlich empfohlen. Eine Einschätzung der Unsicherheiten kann auch für die Auslegung der wasserwirtschaftlichen Sicherheiten hilfreich sein. Neben Modellvalidierung und Plausibilisierung sollen Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden, um die Empfindlichkeit der Modellergebnisse auf die Eingangsgrößen (z. B. Niederschlag) und Modellparameter zu testen. Sensitivitätsanalysen sollten unter hydrologischen Gesichtspunkten (z. B. für ungünstige Situationen) erfolgen. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen sollen hydrologisch interpretiert werden.

6.2. Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse**6.2.1. Bewertung und Interpretation der Ergebnisse**

Die zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse in Hinblick auf die Aufgabenstellung soll alle Ergebnisse in kohärenter Weise zusammenfassen und interpretieren, um bestmöglich zur Entscheidungsfindung beizutragen. Die Bewertung berücksichtigt nicht nur die numerischen Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung, sondern auch die Zusatzinformationen und Erfahrungen bei der Modellierung sowie den hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Kontext.

Ein wichtiger Aspekt bei der Bewertung ist die Einschätzung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Diese soll, wie oben angeführt, auf den Ergebnissen der Modellvalidierung, Plausibilisierung, Sensitivitätsanalysen und einer hydrologischen Argumentation möglicher Unsicherheiten im Anwendungskontext aufbauen. Die Aussagekraft der Ergebnisse soll der Bedeutung und Komplexität der Fragestellung entsprechend den drei hydrologischen Kategorien (HK) (Kapitel 1.) angemessen sein. Die Synthesebeispiele (Kapitel 8.) lassen sich wie folgt einordnen:

- Synthesebeispiel Rumpelgraben: HK1 (Wasserwirtschaftliche Fragestellungen mit geringem bis mittlerem Schadenspotenzial und einfachen hydrologischen Verhältnissen) bis HK 2 (Wasserwirtschaftliche Fragestellungen mit mittlerem Schadenspotenzial und mittelkomplexen hydrologischen Verhältnissen).
- Synthesebeispiel Pram: HK 2 (Wasserwirtschaftliche Fragestellungen mit mittlerem Schadenspotenzial und mittelkomplexen hydrologischen Verhältnissen).
- Synthesebeispiel Weerbach: HK 2 (Wasserwirtschaftliche Fragestellungen mit mittlerem Schadenspotenzial und mittelkomplexen hydrologischen Verhältnissen).

Generell sollten bei wichtigen, komplexen Fragen (HK 3) die Untersuchungen umfangreicher sein, entsprechend einem größeren Bearbeitungsaufwand und einer größeren Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Bei weniger wichtigen, einfachen Fragen (HK 1) können die Untersuchungen einfacher und kürzer ausfallen.

6.2.2. Bewertung der Qualität mittels Checkliste

Zur Unterstützung einer systematischen Bewertung der Qualität der Modellierung sind den Synthesebeispielen in Kapitel 8. Checklisten beigelegt. Ein Leerformular der Checkliste steht auf der Homepage des ÖWAV zum Download zur Verfügung. Die Checkliste dient nicht nur für einen ersten Einstieg in das vorliegende Regelblatt, sondern zur Überprüfung der einzelnen Empfehlungen des Regelblatts. Mit dieser Entscheidungs- und Bewertungshilfe sollen im Sinne des Regelblatts rasch klare Vorgaben und Anforderungen an das N-A-Modell erarbeitet werden, z. B. im Zuge einer Ausschreibung, aber auch nach Abschluss der Modellierung in Form einer übersichtlichen, zusammenfassenden Gesamtbewertung. Sie soll Transparenz schaffen, welcher Leistungsumfang erforderlich ist und welche Qualität damit erreicht wird. Der Aufwand, der Kosten-Nutzen-Faktor und die Qualität der Berechnungen sollen damit kla-

rer kommuniziert werden. Aufgrund der Komplexität und Vielfalt von N-A-Modellierungen ist eine exakte Abgrenzung der Modellanforderungen und Qualitäten nicht möglich; es soll daher das Hauptaugenmerk auf die Erfassung der wesentlichen Anforderungen und erreichbaren Qualitäten gelegt werden. Die Empfehlungs-Boxen sind eine zusätzliche, rasche Informationsquelle zur Entscheidungsfindung.

Es wird empfohlen diese Checkliste

- vor Beginn der Bearbeitung auszufüllen, um einen Überblick über die zu erbringenden Leistungen zu erhalten, und
- am Ende der Bearbeitung nochmals auszufüllen, um die erzielte Qualität der Modellierung zu überprüfen.

Die Struktur der Checkliste entspricht der des Regelblatts. Am Ende jedes Kapitels findet sich eine Bewertung in Hinblick auf erzielte/erzielbare Qualität, eingeteilt in sehr gering, gering, mittel und hoch. Eine ähnliche Einschätzung ist in Hinblick auf den Aufwand (zukünftiger Aufwand geschätzt oder geleisteter Aufwand ermittelt) vorgesehen. Damit ergibt sich am Ende der Checkliste eine Zusammenstellung der Bewertung nach den Aspekten

- Datenqualität und Verfügbarkeit (Kapitel 2.),
- Modellwahl (Kapitel 3.),
- Parameterwahl (Kapitel 4.),
- Validierung und Plausibilisierung (Kapitel 5.) und
- Interpretation und Bewertung der Ergebnisse (Kapitel 6.).

BOX 6.2: Bewertung der Ergebnisse und Checkliste

Es wird empfohlen, eine zusammenfassende Bewertung und Interpretation der Ergebnisse in Hinblick auf die Aufgabenstellung durchzuführen. Zudem soll die dem Regelblatt beigelegte Checkliste (a) vor Beginn der Bearbeitung ausgefüllt werden, um einen Überblick über die zu erbringenden Leistungen zu erhalten, und (b) am Ende der Bearbeitung nochmals ausgefüllt werden, um die erzielte Qualität der Modellierung zu überprüfen. Insbesondere ist zu bewerten, ob die erreichte Aussagekraft der Ergebnisse der Komplexität und Bedeutung der Fragestellung (hydrologische Kategorien) entspricht.

6.3. Berichtslegung an Auftraggeber

Den Abschluss der Bearbeitung bildet die Berichtslegung an den Auftraggeber. Der Bericht soll die Untersuchungen vollständig und nachvollziehbar darstellen. Der Bericht soll entsprechend den Kapiteln des Regelblattes gestaltet sein. Kapitel 8. gibt Synthesebeispiele zur praktischen Anwendung des Regelblatts, die ebenfalls den Kapiteln des Regelblatts folgen. Gegenüber den Synthesebeispielen kann je nach Bedeutung des Vorhabens (hydrologische Kategorie HK 1, HK 2, HK 3), der Bericht eines konkreten Projekts umfangreicher oder weniger umfangreich ausfallen.

Zur Sicherung eines Qualitätsstandards der Berichtslegung sollte der Projektbericht zumindest die folgenden Punkte enthalten:

- Darstellung der Fragestellung.
- Dokumentation des Einzugsgebietes, der berücksichtigten Daten und ihrer Qualität, und gegebenenfalls Angabe, welche Daten keine Berücksichtigung fanden, mit Begründung.
- Dokumentation der Modellwahl inklusive der ausschlaggebenden Gründe für die Konzeption im hydrologisch/wasserwirtschaftlichen Kontext.
- Dokumentation der Wahl der Modellparameter (Kalibrierung bzw. A-priori-Wahl), hydrologische Argumentation, womöglich im Zusammenhang der Erfahrungen aus Feldbegehungen.

- Dokumentation der Validierung und Plausibilisierung sowie Aufbereitung und Darstellung der Modellierungsergebnisse.
- Dokumentation der Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse, der Einschätzung der Qualität der Modellierung nach der Checkliste sowie Interpretation der Ergebnisse im Kontext der Gesamtfragestellung.

Eingangsdaten, gewählte Parameter, Software und Modellergebnisse sind für einen Zeitraum von mindestens 10 Jahren digital zu archivieren, um die Wiederholbarkeit der Modellierung zu gewährleisten (Qualitätssicherung) und die Durchführung von Nachfolgestudien zu erleichtern.

Ein wichtiger Punkt in der Projektpräsentation ist die Interpretation und Kommunikation der Unsicherheiten. Die Kommunikation der Unsicherheiten sollte so erfolgen, dass diese in die Entscheidungsfindung miteinbezogen werden können. Die endgültige Entscheidung zu bestimmten Maßnahmen basiert zwar i. d. R. auf den Simulationsergebnissen, die Entscheidungsträger selbst sind aber üblicherweise andere Personen als jene, die die Simulationen durchführen. Somit kann die endgültige Entscheidung auch im Projektbericht nicht vorweggenommen werden.

Während der Erstellung eines N-A-Modells bieten Workshops eine gute Möglichkeit, den Auftraggeber an der Entstehung des Modells teilhaben zu lassen. Er kann dadurch die Möglichkeiten und Grenzen des Modells kennenlernen und die Randbedingungen für die folgende Anwendung besser beurteilen. Es entsteht eine gewisse Vertrautheit mit dem Modell.

Welche Ergebnisse dann für weitere Planungen verwendet werden sollen, hängt von der Aufgabenstellung ab und sollte nach Möglichkeit mit den in die Entscheidungsfindung involvierten Institutionen (z. B. Hydrographische Dienste, Wasserwirtschaftliche Planungsorgane, Raumplanung etc.) abgestimmt werden. Ein bedeutender Vorteil der Niederschlag-Abfluss-Modellierung liegt dabei darin, dass solche Szenarienanalysen, insbesondere auch Prognosen zur zukünftigen Entwicklung (z. B. Landnutzungsänderungen) durchgeführt werden können. Dieser Vorteil gegenüber traditioneller Planung (z. B. Hochwasserstatistik) sollte auch genutzt werden.

BOX 6.3: Berichtslegung und Qualitätsstandards

Der Bericht soll die Untersuchungen vollständig und nachvollziehbar darstellen. Der Bericht soll entsprechend den Kapiteln des Regelblatts gegliedert sein.

Eingangsdaten, gewählte Parameter, Software und Modellergebnisse sind für einen Zeitraum von mindestens 10 Jahren digital zu archivieren, um die Wiederholbarkeit der Modellierung zu gewährleisten (Qualitätssicherung) und die Durchführung von Nachfolgestudien zu erleichtern.

7. Software und Daten

7.1. Kriterien zur Softwareauswahl

Der „durchschnittliche“ Anwender wird sich zur Lösung seiner Aufgabenstellung, von einfach zu lösenden Aufgaben und wissenschaftlichen Untersuchungen abgesehen, meist einer vorhandenen Software bedienen. Er steht daher vor dem Problem, eine geeignete Software auswählen zu müssen. Da diese Wahl naturgemäß stark von persönlichen Vorlieben und etwaigen eigenen Erfahrungen geprägt ist, werden nachfolgend beispielhaft einige Kriterien und Überlegungen zur Softwareauswahl genannt, welche in die Entscheidungsfindung mit einbezogen werden und die Auswahl unterstützen können (siehe auch Kapitel 3.1. Kriterien für die Modellwahl).

Anwendungstyp: Für „ingenieurmäßige“ Anwendungen ist meist eine ausprogrammierte, stabil laufende Software erforderlich, im wissenschaftlichen Bereich wird der Programmcode oft erst selbst entwickelt.

Anwendungszweck: Simulation (möglichst gute Nachbildung maßgeblicher Prozesse), Bemessungsaufgaben (z. B. schutzwasserbauliche Maßnahmen) oder Vorhersagen (Zuflussvorhersage, Hochwasserprognosen) erfordern oft unterschiedliche Modelle bzw. Modelltypen.

Datenverfügbarkeit: Die Qualität eines N-A-Modells hängt nicht unbedingt von einer möglichst großen Parameteranzahl ab, da entsprechende Messwerte oft nicht vorhanden sind bzw. nur unzureichend abgeschätzt werden können. Das gewählte Modell sollte jedenfalls die vorhandenen Daten berücksichtigen können.

Aufwand für die Datenaufbereitung: Länderspezifische Datenformate oder Eigenformate der Hersteller erschweren das Datenhandling. Wenn Standarddatenformate verwendet werden können, entsteht kein zusätzlicher Aufwand für das Umwandeln von Daten.

Aufwand für den (Erst-)Einstieg: Wird eine Software zum ersten Mal verwendet, ist der erforderliche Zeitaufwand für die Einarbeitung ein wichtiges Kriterium.

Dokumentation: In welcher Sprache wurde das Handbuch verfasst? Erläutert die oft umfangreiche Dokumentation alle verwendeten Modelle, sind die einzusetzenden Parameter klar beschrieben? Ist das Softwarehandling beschrieben, gibt es Anwendungsbeispiele für ein Musterprojekt (Tutorial)?

Bedienoberfläche und Benutzerfreundlichkeit: Ist das Programmpaket gut bedienbar (ist z. B. Hilfe kontextbezogen direkt aus dem jeweiligen Dialog zu bekommen)? Ist die Ein- und Ausgabe der Daten übersichtlich? Kann man mit mehreren Fenstern arbeiten? Wie einfach sind Varianten erstellbar?

Betriebssystem – Stabilität: Läuft das Programm auf einem Standardbetriebssystem (Windows, Linux oder andere Umgebung)? Hat das Programm eine interne Fehler- und Plausibilitätsprüfung der Daten? Wie stabil ist das Programm? Wie erfolgt die Behebung von Softwarefehlern? Wie viele Installationen der verwendeten Software sind österreichweit bzw. weltweit im Einsatz?

Support und Weiterentwicklung: Wie erfolgt die Unterstützung (Hotline) zur Problembeseitigung, welche Kosten sind damit verbunden? Wird das Programm weiterentwickelt (Abwärtskompatibilität)? Gibt es Anwendertreffen (user groups) mit Erfahrungs- und Informationsaustausch?

7.2. Kurzdarstellung gängiger Software

In der nachfolgenden alphabetischen Aufzählung, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, werden in Österreich häufig verwendete Modelle bzw. Softwareprodukte gelistet.

7.2.1. Hydrologie

Anmerkung: Die unten angeführten Kosten sind zuzüglich MwSt. zu verstehen (Stand 2018).

BROOK (Federer and Lash 1978; BROOK2; BROOK90)

ist ein physikalisch basiertes Bilanzierungsmodell für vorwiegend kleine Einzugsgebiete. Als Inputparameter werden der Tagesniederschlag und die mittlere Tagestemperatur benötigt. Es ist kein Routing-Anteil implementiert. Für die Simulation oder Vorhersage von Hochwasserereignissen nicht geeignet.

Link: www.ecoshift.net/brook/brook90.htm

Kosten: kostenlos

BLUE M (TU Darmstadt IHWB)

ist ein Softwarepaket zur integrierten Bewertung und immissionsbasierten Modellierung von Flusseinzugsgebieten. Das hydrologische Modell BlueM.Sim ist ein physikalisch basiertes, räumlich verteiltes, deterministisches Modell für Ereignis- und Langzeitsimulationen. Hauptanwendungsgebiet ist die Simulation von integrierten Systemen, die sowohl ländliche wie auch urbane Einzugsgebiete umfassen. Neben der Niederschlag-Abfluss-Modellierung ist auch ein Wassergütemodell für Oberflächen und Wasserkörper in BlueM.Sim integriert. Das Paket beinhaltet neben dem hydrologischen Modellkern (BlueM.Sim) Tools zur Zeitreihenvisualisierung und -analyse (BlueM.Wave), das Monitoring-Tool BlueM.Analyzer sowie die Toolbox BlueM. Opt zur Autokalibrierung und Sensitivitätsanalyse. BlueM.GIS erlaubt darüber hinaus die GIS-basierte Erstellung von Input-Files.

Link: <http://www.bluemodel.org>

Kosten: kostenlos (Registrierung erforderlich). Sourcecode auf Anfrage für Forschungseinrichtungen erhältlich.

COSERO (Continuous Semidistributed RunOff Model – IHWB BOKU Wien)

ist ein kontinuierliches halbverteilttes, deterministisches Modell, in dem die Abflussprozesse durch eine Abfolge von linearen Speichern beschrieben werden. Als Inputdaten werden Temperatur- und Niederschlagsdaten benötigt. Das Modell ist eine Weiterentwicklung des HBV-Modells und wird auch operationell für die Hochwasservorhersage im Salzacheinzugsgebiet (HYDRIS II) eingesetzt.

Link: <https://boku.ac.at/wau/hywa>

Kosten: anwendungsbezogen

HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model; Bergström 1976, 1992)

ist ein halbverteilttes, konzeptionelles Niederschlags-Abfluss-Modell. Es wurde vom Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut (SMHI) entwickelt und wird weltweit eingesetzt. Eine Weiterentwicklung erfolgte z. B. als TUW-HBV (TU Wien), KAMPUS (TU Wien) und COSERO (BOKU IHWB). HBV ist gridbasiert und geht von Gebieten gleicher hydrologischer Antwort-Eigenschaften (Hydrological Response Units) aus.

Link: www.smhi.se/en/research/research-departments/hydrology/hbv-1.90007

Kosten: Für wissenschaftliche Zwecke kostenlos, für kommerzielle Anwendungen kann eine Lizenz bei SMHI erworben werden

HEC-HMS

ist ein hydrologisches Modellsystem, das den Abfluss aus untergliederten Einzugsgebieten berechnet. Es kann sowohl städtische als auch natürliche Einzugsgebiete modellieren. Das Programmpaket besitzt eine einheitliche Oberfläche für eine Vielzahl von Modellen für verschiedene Teilprozesse, von der Abflussbildung über Transformation in eine Abflusswelle und Routing in den Gewässern. Auch technische Bauwerke wie Rückhaltebecken können modelliert werden. Für fixen Abflussbeiwert, das CN-Verfahren und das Soil-moisture-accounting-Verfahren kann das Modellgebiet auch in einem Raster bearbeitet werden. HEC-HMS enthält sowohl ereignisbasierte als auch kontinuierliche Modelle. Es gibt eine ausführliche Dokumentation, das Programm ist leicht erlernbar.

Link: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms>

Kosten: kostenlos

HQsim (Kleindienst 1996)

ist ein kontinuierliches, teilflächenbasiertes Niederschlag-Abfluss-Modell, welches eine Weiterentwicklung des Wasserhaushaltsmodells BROOK (Federer und Lash 1978) darstellt. HQsim bildet Einzugsgebiete in Form von homogenen Teilflächen (Hydrotopen – auch Hydrological Response Units HRUs) ab. Die Vorprozessierung der Parameterdaten erfolgt in einer externen GIS-Software. Das Modell wird für die Hochwasserprognose Tiroler Inn (HOPI) sowie zur Ermittlung von Bemessungs- und Sicherheitshochwässern in hochalpinen Einzugsgebieten eingesetzt.

Link: <http://www.grid-it.at/hqsim>

Kosten: anwendungsbezogen

IHW (Uni Karlsruhe)

ist ein Softwarepaket, das ein ereignisbasiertes N-A-Modell enthält. Es können sowohl Einzelgebiete als auch Flussgebiete modelliert werden. Das IHW-Paket, das auch diverse Statistikprogramme enthält, ist einfach zu erlernen und beinhaltet die für die meisten Ingenieur Anwendungen notwendigen Routinen (statistische Analyse von Extremwerten, Auswertung von beobachteten Hochwasserereignissen, Niederschlag-Abfluss-Modelle für kleine Einzugsgebiete, detaillierte Niederschlag-Abfluss-Modellierung in einem komplexen Einzugsgebiet (FGM), Zusatz- und Analyseprogramme). Die erste Programmversion entstand 1991 am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG), Abteilung Hydrologie (damals IHW) und wurde seitdem kontinuierlich weiterentwickelt.

Link: http://hyd.iwg.kit.edu/softwarepaket_hochwasser.php

Kosten: ca. € 950 bzw. Update € 480

KAMPUS (TU Wien, Reszler et al. 2008ab; Blöschl et al. 2008a)

ist ein kontinuierliches, konzeptionelles Wasserbilanzmodell auf Rasterbasis. Es verfügt über ein Bodenfeuchtemodul zur Berechnung der Abflussbildung und der Verdunstung. Die Abflusskonzentration am Hang wird durch mehrere Speicher beschrieben und kann den Abfluss in Makroporen wiedergeben. Gerinnerouting wird durch eine nichtlineare Speicherkaskade beschrieben. Das Modell enthält ein Schneemodul unter besonderer Berücksichtigung von Regen-auf-Schnee-Ereignissen. Das Modell eignet sich zur Anwendung des Dominant-Processes-Konzepts für die Parameterbestimmung. Es wird operationell für die Abflussvorhersage in Niederösterreich und Oberösterreich eingesetzt. Es wurde für Untersuchungen der Auswirkung von Landnutzungsänderungen, Klimawandel und wasserbaulichen Maßnahmen sowie für die Berechnung von Bemessungshochwässern verwendet.

Link: www.hydro.tuwien.ac.at/home

Kosten: anwendungsbezogen

LARSIM (Large Area Runoff Simulation Modell)

ist ein rasterbasiertes oder einzugsgebietsbezogenes Modell, basierend auf dem Programm FGMOD und wird im ereignisbezogenen Flussgebietsmodus bzw. im Wasserhaushaltsmodus zur Hochwasservorhersage, zur Abschätzung von Bemessungsereignissen sowie zur Simulation des Wasserhaushalts verwendet. Die Entwicklung erfolgt durch verschiedene Ingenieurbüros. Das Modell wird zur Hochwasservorhersage an der Großache und am Lech vom Hydrographischen Dienst Tirol, an der Bregenzerach und an der Ill vom Hydrographischen Dienst Vorarlberg sowie in mehreren deutschen Bundesländern und verschiedenen Regionen in Frankreich und Luxemburg verwendet.

Link: www.larsim.info/das-modell

Kosten: kostenlos, auf Anfrage

LUNA (Rehm Software GmbH)

ist ein ereignisbasiertes N-A-Modell für ländliche und städtische Einzugsgebiete und Flussgebiete. Die Berechnung des Effektivniederschlags ist mit konstantem und zeitlich variablem Verlauf des Abflussbeiwertes möglich. Zur Regionalisierung der Abflusskonzentrationsparameter für die Einheitsganglinie und lineare Speicherkaskaden steht u. a. das Verfahren nach Lutz zur Verfügung. Seeretention und Gerinnerouting (z. B. nach dem Kalinin-Miljukow-Verfahren) sowie technische Bauwerke wie Rückhaltebecken und Überlaufbauwerke können modelliert werden. LUNA verfügt über eine AutoCAD-Anbindung. Das Programm ist leicht erlernbar. Handbuch, Schulung und Support durch den Hersteller sind verfügbar.

Link: <https://www.rehm.de/software/riverpac/luna>

Kosten: ab € 2.400, Zusatzmodule einzeln zu beziehen

MIKE SHE (DHI, Abbott et al. 1986; Reefsgaard and Storm 1995)

ist ein kontinuierlich bilanzierendes, integriertes, physikalisch basiertes, flächendetailliertes Modell, in welchem die Ansätze für die hydrologischen Prozesse modulartig gekoppelt sind. Je nach Aufgabenstellung und Gebietscharakteristik können bestimmte Module zu- oder ausgeschaltet werden. Für die Schneeschmelze wird das Grad-Tag-Verfahren verwendet, die Verdunstung wird über empirische Ansätze aus den Parametern LAI und effektiver Durchwurzelungstiefe berechnet, für den Oberflächenabfluss stehen ein Diffusionswellenansatz (Vereinfachung der Saint-Venant-Gleichungen) und ein vereinfachter Speicheransatz auf Gebietsbasis (lumped) zur Verfügung, für die Infiltration und die Berechnung in der ungesättigten Zone ist die volle Richards-Gleichung oder als vereinfachte Variante wählbar und für die gesättigte Zone stehen ein Grundwasserströmungsmodell oder vereinfacht ein System aus mehreren Linienspeichern auf Teileinzugsgebietsbasis zur Verfügung. Die Anwendungen von MIKE SHE reichen von der Modellierung der Grundwasserneubildung und -strömung in Porengrundwassergebieten bis zur Wasserbilanz- und Abflussmodellierung in kleinen bis mittleren Einzugsgebieten. Das Modell enthält weiters auch Berechnungsmodule für Schadstofftransport, Wasserqualität und Bewässerungssysteme. Die Verarbeitung erfolgt auf Rasterbasis, generelle GIS-Arbeiten können in der Software-Oberfläche durchgeführt werden.

Link: www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-she

Kosten: kommerziell, ca. € 16.000, jährliche Lizenzkosten € 2.000 bis 3.000

NAM (DHI, Havno et al. 1995)

ist ein konzeptionelles Niederschlag-Abfluss-Modell, das Teil des Pakets MIKE11 ist. Kern von MIKE11 ist ein hydrodynamisches Modell, das die eindimensionalen Flachwassergleichungen mit einem impliziten Finite-Differenzen-Verfahren löst. Das Modell NAM ist dabei zur Modellierung der lateralen Zuflüsse auf Teileinzugsgebietsbasis vorgesehen. Es simuliert den Wasserhaushalt kontinuierlich in den vier miteinander verbundenen Speicherzonen (i) Schneeschicht, verteilt nach Geländehöhen, (ii) Oberflächenzone bzw. Vegetation, kleine Gerinne und Seen, (iii) Bodenzone, bis zu der Tiefe, aus der Pflanzenwurzeln Wasser ziehen, und (iv) Grundwasser. MIKE11 kann an die Niederschlags-Abfluss-, die Kanalnetz- und Grundwassermodelle

des Danish Hydraulic Institutes (DHI) – auch mit MIKE SHE – gekoppelt werden.

Link: www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-hydro-river

Kosten: kommerziell, MIKE HYDRO RIVER ca. € 16.000, jährliche Lizenzkosten € 2.000 bis 3.000

NASIM

ist ein flächendetailliertes, kontinuierliches Wasserbilanzmodell auf Flussgebietsbasis. Es ist als konzeptionelles Niederschlag-Abfluss-Modell für Ingenieur Anwendungen zur Simulation von Abflüssen sowohl aus natürlichen als auch aus städtischen Einzugsgebieten geeignet. Es wird aber auch von wasserwirtschaftlichen Behörden und Universitäten vor allem im deutschen Raum eingesetzt.

Link: www2.hydrotec.de/vertrieb/nasim

Kosten: kommerziell, ca. € 10.000

P2R (Precipitation to Runoff, Hebenstreit 2000)

ist ein konzeptionelles Modell, das in Anlehnung an das HBV-Modell für die Abflussmodellierung im Bereich der Klimafolgenforschung sowie der operationellen Zuflussvorhersage in der Energiewirtschaft adaptiert/erweitert wurde. Das jeweilige Einzugsgebiet des zu berechnenden Pegels wird dabei durch eine vertikale Bodensäule beschrieben und durch mehrere lineare Speicher repräsentiert, die die einzelnen Abflussanteile simulieren. Alle die Bodensäule kennzeichnenden Parameter sind mittlere Gebietswerte. Es werden mehrere Höhenzonen unterschieden, für die jeweils die Schneedecke (Akkumulation und Ablation) und die Schneeverteilung mit einem Schneeschmelzmodell simuliert werden. Das berechnete Schmelzwasser wird der Bodenzone zugeführt und wirkt auf diese wie ein Niederschlagsinput. Aus der Bodenzone ist sowohl Evapotranspiration als auch Versickerung in die Bodenspeicherkaskade möglich. Als Inputdaten werden zumindest Temperatur und Niederschlagsdaten benötigt; optional ist auch die Verwendung von Strahlungsdaten möglich. Das Modell ist als Modul des Energiewirtschaftlichen Planungssystems Verbund (EPV) im Einsatz und wird für die operationelle Zuflussvorhersage verwendet.

PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration-Hydrotope-Model, Viviroli et al. 2009)

ist ein verteiltes hydrologisches Modell für gebirgige Gebiete. PREVAH benutzt weitestgehend auf physikalischen Algorithmen basierende Parameter und besteht aus mehreren Subsystemen (Schneemodul, Gletschermodul, Interzeptionsmodul, Modell für Bodenwasserspeicher und Entleerung durch Evapotranspiration, Modell zur Abflussbildung und -konzentration sowie Hochwasserabflussberechnung). Das Modell kann für jede Rasterzelle, aber auch auf eine Aggregation von räumlich verteilten Rasterzellen mit gleichen Eigenschaften hinsichtlich ihrer hydrologischen Systemantwort (HRUs) angewandt werden. In PREVAH ist das Tool WINHRU implementiert, welches u. a. die Ableitung von HRUs unter benutzerspezifischen Kriterien ermöglicht. PREVAH wird u. a. am Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) zur Hochwasservorhersage und im K-Net-Projekt (AB Umwelttechnik TU Innsbruck) verwendet.

Link: www.hydrologie.unibe.ch/PREVAH

Kosten: kostenlos, auf Anfrage

SES (TU Wien, alpS)

ist ein flächendetailliertes Energiebilanzmodell, das auf Rasterbasis die Energiebilanz aus kurz- und langwelliger Strahlung, fühlbarem und latentem Wärmestrom berechnet und die saisonale Schneedecke sowie den Firn bilanziert. SES arbeitet mit wählbaren Zeitschritten. Gletschereis schmilzt nur, akkumuliert nicht, Schmelzwasser wird mit einem Abflussmodul (fünf parallele Nash-Kaskaden für Schnee, Firn, Eis, unvergletschertes Gebiet und Boden) ans Gerinnenetz weitergeleitet. Ein durch einen Koeffizienten festgelegter Anteil der Schmelze aus den vergletscherten bzw. unvergletscherten Bereichen gelangt in den langsamer reagierenden Bodenspeicher. Die Summe des Outputs aus den fünf Speichern bildet dann den

Abfluss. SES wird für die Hochwasserprognose Tiroler Inn (HOPI) sowie zur Ermittlung von Bemessungs- und Sicherheitshochwässern in hochalpinen Einzugsgebieten eingesetzt.

Link: www.hydro.tuwien.ac.at/home

Kosten: anwendungsbezogen

TOPMODEL (Beven and Kirkby 1979; Beven 1995)

ist ein kontinuierliches, konzeptionelles Wasserbilanzmodell der Universität Lancaster. Es kann Einzelgebiete unter Verwendung von flächendetaillierter Geländeinformation modellieren und ist eher für wissenschaftliche Fragestellungen geeignet. TOPMODEL ist in Grass-GIS Version5 integriert.

Link: <https://CRAN.R-project.org/package=topmodel>

Kosten: anwendungsbezogen

TUW-HBV-Modell (Parajka et al. 2007)

ist ein kontinuierliches, konzeptionelles Wasserbilanzmodell auf Teilgebietsbasis. Es verfügt über einen Bodenfeuchtemodul zur Berechnung der Abflussbildung und der Verdunstung. Die Abflusskonzentration am Hang wird durch mehrere Speicher beschrieben. Das Modell enthält ein Schneemodul und verfügt über eine automatische Routine zur Kalibrierung.

Link: <https://CRAN.R-project.org/package=TUWmodel>

Kosten: kostenlos

WaSiM (Schulla 1996, 2017)

ist ein deterministisches, verteiltes hydrologisches Einzugsgebietsmodell für den mesoskaligen Bereich zur Simulation des Wasserkreislaufs. Die ihm zugrunde liegenden Gleichungen sind eine gewogene Mischung physikalisch begründeter und konzeptioneller Ansätze. Das mit PREVAH verwandte Programm wurde u. a. im Projekt GLOWA Danube (www.glowa-danube.de/de/projekt/projekt.php) eingesetzt.

Link: www.wasim.ch

Kosten: kostenlos

WMS (Watershed Modelling System)

ist als übergeordnetes Softwareprodukt des Hydrologic Engineering Center (HEC) zu sehen welches das Pre- und Post-Processing für HEC-HMS bzw. HEC-RAS übernimmt.

Link: www.aquaveo.com/software/wms-watershed-modeling-system-introduction

Kosten: ab \$ 2.750

ZEMOKOST (Zeller modifiziert nach Kohl und Stepanek, Kohl 2011; Stepanek et al. 2004)

ist ein ereignisbasiertes, konzeptuelles, teilflächenbasiertes N-A-Modell zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen in unbeobachteten Wildbacheinzugsgebieten. Anhand nachvollziehbarer, einfach zu erhebender Parameter werden Hochwasserganglinien für die Bemessung praktikabel berechnet und visualisiert. ZEMOKOST basiert auf einem modifizierten Laufzeitverfahren. Die zugeführte Niederschlagsmenge (Blockregen) erzeugt für definierte Teileinzugsgebiete Abflussganglinien, die anhand ihrer Fließzeiten (Laufzeiten) an der Oberfläche und im Gerinne überlagert werden. Die abflusswirksame Regenmenge wird nach dem Flutplanverfahren aus dem Produkt von Abflussbeiwert und Gesamtniederschlagsmenge berechnet. Mit gängigen, empirischen Fließformeln (Izzard-Formel für den Oberflächenabfluss, Rickenmann für den Gerinneabfluss) werden die Laufzeiten ermittelt. Optional können in ZEMOKOST Zwischenabfluss, Zu- und Ableitungen, Basisabfluss, Schneeschmelze, Speicher sowie Retentionen bzw. Pufferwirkungen berücksichtigt werden.

Link: bfw.ac.at/rz/bfwcms_mobil.web?dok=9817

Kosten: kostenlos

7.2.2. Siedlungswasserwirtschaft

In der Siedlungsentwässerung werden in den meisten Modellen unterschiedliche Modellansätze für die Berechnung des Oberflächenabflusses (Abflussbildung und Konzentration) und den Abfluss im Kanal verwendet.

Anhand des Berechnungsmodells für den Abflusstransport im Kanal erfolgt auch die typische Einteilung der Modelle bzw. Softwarepakete in „konzeptionelle“ und „hydrodynamische“ Modelle, welche sich allerdings meist in der Berechnung der Niederschlag-Abfluss-Beziehung nicht oder nur geringfügig unterscheiden. Bei den konzeptionellen Modellen wird der Abfluss im Kanal z. B. über Speicherkaskaden und das Muskingum-Verfahren berechnet, meist werden nur die Hauptstränge des Kanalsystems abgebildet. In den physikalisch basierten „hydrodynamischen“ Modellen werden in der Regel die Saint-Venant’schen Gleichungen zur Berechnung des Abflusses im Kanal verwendet. Im Folgenden wird bei den einzelnen Softwarepaketen kurz auf die möglichen Ansätze der N-A-Berechnung hingewiesen, eventuelle Besonderheiten werden hervorgehoben.

City Drain (II-m – CityDrain III/C++, AB Umwelttechnik, Innsbruck)

ist eine blockbasierte Open-Source-Software zur integrierten Modellierung urbaner Abwassersysteme. Die verschiedenen Elemente eines Entwässerungssystems (z. B. Einzugsgebiet, Kanal, Mischwasserüberlaufbecken, Kläranlage, Fluss) werden in Blöcken abgebildet, welche beliebig angeordnet und verknüpft werden können. Es wird eine umfangreiche Blockbibliothek angeboten, nicht zur Verfügung stehende Blöcke können aber vom Anwender auch mit geringen Programmierkenntnissen selbst geschrieben werden. CityDrain II erfordert Matlab/Simulink und kann somit auf die Funktionalität dieser Software zurückgreifen. Eigene Blöcke können in Matlab geschrieben werden. CityDrain III ist ein eigenständiges Produkt in C++, eigene Blöcke werden in Python geschrieben. CityDrain III erlaubt parallelisiertes Rechnen und somit die Ausnutzung von modernen Mehrprozessorsystemen. Derzeitige Anwendungen in Reutte, Linz, Bogota, China, Schweden.

Link: www.hydro-it.com/extern/IUT/citydrain

Kosten: kostenlos

HYKAS (Rehm Software GmbH)

ist ein Modell zur hydraulischen Berechnung von Kanalnetzen für Einzelereignisse und lange Regenreihen. Die Abflussbildung erfolgt u. a. nach dem SCS-Verfahren, die Abflusskonzentration über lineare Speicherkaskaden. Der Abfluss im Kanalnetz wird eindimensional hydrodynamisch instationär (St. Venant) berechnet. Zudem steht eine stationäre Berechnungsmethode nach dem Fließzeitverfahren zur Verfügung. Mit HYKAS kann auch eine gekoppelte Simulation (1D/2D) durchgeführt werden. Außerdem erlaubt HYKAS basierend auf der hydrodynamischen Langzeit-Kontinuum-Simulation eine Simulation von Schmutzfrachten. Handbuch, Schulung und Support durch den Hersteller sind verfügbar.

Link: <https://www.rehm.de/software/sewerpac/hykas>

Kosten: ab € 6.000, Zusatzmodule einzeln zu beziehen

HYSTEM-EXTRAN (itwh)

ist ein hydrodynamisches Niederschlag-Abfluss-Modell, mit dem sich Kanalnetzberechnungen sowohl für Einzelereignisse als auch als Langzeit-Seriensimulation durchführen lassen. Als Einzelereignis können Modellregen oder natürliche Regen angesetzt werden. Es gibt ein Handbuch, Schulung erfolgt durch den Hersteller.

Link: www.itwh.de/de/software/software-produkte/produkt-detailansicht/hystem-extran.html

Kosten: ab € 5.000, Zusatzmodule einzeln zu beziehen

KAREN (hydro-IT)

ist eine österreichische Software, die von hydro-IT vertrieben wird. Sie ist auf die Nachweise zur Anwendung des ÖWAV-Regelblatts 19 (ÖWAV 2007b) zur Bemessung von Mischsystemen abgestimmt. In den Teileinzugsgebieten erfolgt keine getrennte Berechnung von Oberflächenabfluss und Kanaltransport. Die Berechnung der Abflussbildung erfolgt nach einer modifizierten Grenzwertmethode, die Berechnung der Abflusskonzentration nach dem Zeit-Flächen-Diagramm. Es gibt ein gutes Handbuch sowie das Angebot von Schulungen, keine GIS-Anbindung, Support durch Hersteller.

Link: www.hydro-it.com/produkte/karen

Kosten: Einzelplatz € 1.250, Mehrplatz € 1.750

KOSIM (itwh)

ist eine in Deutschland weit verbreitete Software zur konzeptionellen Modellierung von Kanalnetzen mit unterschiedlichen Berechnungsansätzen für versiegelte, teilversiegelte und unversiegelte Flächen. Die Berechnung von Oberflächenabfluss und Kanalabfluss erfolgt getrennt. KOSIM bietet die Möglichkeit der Schmutzfrachtsimulation, die Abflussbildung erfolgt nach der Grenzwertmethode, die Abflusskonzentration wird über parallele lineare Speicherkaskaden berechnet. In der neuesten Version ist eine GIS-Anbindung möglich. Es gibt ein gutes Handbuch, Angebot von Schulungen und Support von itwh.

Link: www.itwh.de/de/software/software-produkte/produkt-detailansicht/kosim.html

Kosten: ab € 5.500

MIKE URBAN (dhi)

ist ein Modell, das unterschiedliche Berechnungsansätze für versiegelte und unversiegelte Flächen verwendet. Die Berechnung von Oberflächenabfluss und Kanaltransport erfolgt getrennt. Es gibt die Möglichkeit der Berechnung dualer Entwässerungssysteme (Kopplung von Kanal und Oberfläche unter Berücksichtigung der Fließverhältnisse im Kanal, z. B. Überstau) ab Version 2009. Mike Urban bietet die Möglichkeit einer Schmutzfrachtsimulation. Ein Ansatz für die Infiltration von Fremdwasser in die Kanalisation ist implementiert. Die Abflussbildung erfolgt nach der Grenzwertmethode für versiegelte Flächen, für unversiegelte Flächen kann zwischen Horton, Green-Ampt und SCS-CN gewählt werden. Die Abflusskonzentration wird entweder über Zeit-Flächen-Diagramm, lineare Speicherkaskaden oder kinematische Welle berechnet. Es gibt ein gutes Handbuch, Schulungen sowie direkte Anbindung zu Arc-GIS.

Link: www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-urban

Kosten: € 5.000

SWMM (Stormwater Management Model, EPA)

ist ein weltweit verbreitetes Modell der amerikanischen Environmental Protection Agency (EPA). Es verwendet unterschiedliche Berechnungsansätze für versiegelte und unversiegelte Flächen. Die Berechnung von Oberflächenabfluss und Kanalabfluss erfolgt getrennt, es bietet die Möglichkeit des Routings an der Oberfläche zwischen den Teileinzugsgebieten und Möglichkeit der Berechnung dualer Entwässerungssysteme (Kopplung von Kanal und Oberfläche unter Berücksichtigung der Fließverhältnisse im Kanal, z. B. Überstau). SWMM kann Schmutzfracht simulieren sowie Schnee und Grundwasser berücksichtigen. Ein Ansatz für die Infiltration von Fremdwasser in die Kanalisation ist ebenfalls implementiert. Die Abflussbildung erfolgt nach der Grenzwertmethode für versiegelte Flächen, für unversiegelte Flächen kann zwischen Horton, Green-Ampt und SCS-CN gewählt werden. Die Abflusskonzentration wird über die kinematische Welle ermittelt. Es gibt ein gutes Handbuch, Schulungen erfolgen in den USA/Kanada, keine direkte GIS-Anbindung, aber relativ einfacher Import. Mailinglist (Fragen mit kurzen Antwortzeiten < 1 Tag).

Link: www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm

Kosten: kostenlos

7.3. Softwarevergleich

In den nachfolgenden Tabellen werden die zuvor beschriebenen Softwareprodukte und die verwendeten Modelle in Kurzform vergleichend dargestellt bzw. die wichtigsten Kenngrößen beschrieben.

7.3.1. Hydrologie

Tab. 7-1 Softwarevergleich Hydrologie (N = Niederschlag, T = Lufttemperatur, PET = potenzielle Verdunstung, G = Globalstrahlung)

Software	Anwender	Anwendung	Modelltyp zeitlich	kleinste zeitl. Auflösung	Modelltyp räumlich	Hydrometeor. Eingangsdaten	Abflussbildung	Abflusskonzentration	Gletscher	Schnee	Grundwasser	Flussrouting	Datenaufwand	Sprache / Manual	Einarbeitungsaufwand	Weiterentwicklung/Support
Brook	Ingenieurbüro	Wasserbilanz	Ereignis und kontinuierlich	Tage	flächendetailliert	N, T, Luftfeuchte, Wind, G	Richards-Gleichung, Bypass-Flow, Makroporen	Quasiphysikalische Wasserbewegung im Hang	-	Gradtagverfahren	Quasiphysikalische Wasserbewegung im Hang	nein	mittel	englisch / ja	mittel	ja/-
Blue M	Ingenieurbüro	Bemessung	Ereignis und kontinuierlich	Minute	Einzugsgebiete	N, T, PET	SCS, Funktion der Bodenfeuchte	Speichererkaskade	-	Gradtagverfahren, Knauf	Bodenspeicher, Grundwasserspeicher	Translation, Re-ention	mittel	deutsch, englisch/ ja	mittel	Ja / user group
Cosero	wissenschaftlich, operationell	Vorhersage	kontinuierlich	Minute	Teilgebiete, Zonen	N, T, PET	Funktion der Bodenfeuchte	Speichererkaskaden	vereinfacht	Gradtagverfahren	Bodenspeicher, Grundwasserspeicher	Translation, Linear-speicher	mittel	deutsch, englisch/ ja	mittel	-
HBV	wissenschaftlich, operationell	Wasserbilanz, Vorhersage, Bemessung	kontinuierlich	Minuten	Group Response Unit	N, T, PET	Funktion der Bodenfeuchte	Speicher	Speicher	Gradtagverfahren	Bodenspeicher, Grundwasserspeicher	Dreiecksgewichtung oder Speicherung	mittel	englisch / ja	mittel	Ja / user group
HEC-HMS	Ingenieurbüro	Ereignis und Bemessung	kontinuierlich	Minute	Raster, Einzugsgebiete	N, T, PET	SCS, Green-Ampt, konstante oder exponentielle Rate, Smith-Parlange	Kinematische Welle, Snyder, Clark, SCS	-	Gradtagverfahren	Bodenspeicher, Grundwasserspeicher	Muskingum, Muskingum-Cunge	mittel	englisch / ja	gering bis mittel	ja/-
HQsim	wissenschaftlich, operationell	Vorhersage, Bemessung	kontinuierlich	Stunde	Hydrological Response Units	N, T	Funktion der Bodenfeuchte	Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss, Mualem van Genuchten	Gradtagverfahren	Gradtagverfahren, Knauf	Bodenspeicher, Grundwasserspeicher	Translation	mittel	deutsch / ja	mittel	-
IHW	Ingenieurbüro	Bemessung	Ereignis	Minute	Einzugsgebiete, Zonen	N	Lutz, Koaxialdiagramm, SCS, div. empir. Abflussbeiwertansätze	Einheitsganglinie, Speichererkaskaden	-	nein	Bodenspeicher	Kalmin-Miljukov	gering	deutsch / ja	gering	ja/-
KAMPUS	wissenschaftlich, operationell	Vorhersage, Bemessung	kontinuierlich	Stunde	Raster, Hydrological Response Units, Teilgebiete	N, T, PET	Funktion der Bodenfeuchte	Speicher	-	Gradtagverfahren	Bodenspeicher, Grundwasserspeicher	nichtlineare Nash-Kaskade	mittel	deutsch / ja	mittel	ja/-
LARSIM	Ingenieurbüro, Verwaltung, operationell	Vorhersage, Bemessung	Ereignis und kontinuierlich	Minute	Raster, Teilgebiete	N, T, Luftfeuchte, Wind, G, Sonnenscheindauer	Funktion der Bodenfeuchte	Parallelspeicher aus Direktabflussspeicher, Interflow und Grundwasser	ja	Gradtagverfahren, Knauf, Energiebilanz	Bodenspeicher, Grundwasserspeicher	Translation, Re-ention	mittel	deutsch / ja	mittel	Ja / usergroup
LUNA	Ingenieurbüro	Bemessung	Ereignis	Minute	Einzugsgebiete, Zonen"	N	Lutz, SCS, div. empirische Abflussbildungsansätze*	Einheitsganglinie, Speichererkaskade, Nash-Kaskade, LUTZ, SCS-Casparly, Kirpich	nein	nein	nein	Kalmin-Miljukov, Speichererkaskade, Seerention, Überlaufbauwerke	gering	deutsch/ ja	gering	ja/ ja
MIKE SHE	Ingenieurbüro, operationell	Vorhersage, Wasserbilanz	kontinuierlich	Minute	Raster	N, T, PET	Richards-Gleichung, Gravity-Flow	2D Oberflächenabfluss, vereinfacht Linearspeicher	-	Gradtagverfahren	Darcy Grundwassermodell	1D-Hydraulik mit Mike11	hoch	englisch / ja	hoch	ja / ja
NAM	Ingenieurbüro	Wasserbilanz, Vorhersage, Bemessung	kontinuierlich	Minuten	Teilgebiete, Zonen	N, T, PET	Funktion der Bodenfeuchte	Speicher	-	Gradtagverfahren	Bodenspeicher, Grundwasserspeicher	1D-Hydraulik mit Mike11	mittel	englisch / ja	mittel	ja / ja
NASIM	Ingenieurbüro	Wasserbilanz, Vorhersage	kontinuierlich	Stunde	flächendetailliert	N, T, PET	Funktion der Bodenfeuchte	Speicher	-	Gradtagverfahren	Bodenspeicher, Grundwasserspeicher	nichtlinearer Kalmin-Baustein	mittel	deutsch / ja	mittel	ja / ja
P2R	wissenschaftlich, operationell	Vorhersage	kontinuierlich	Stunde	Group Response Units	N, T, (Strahlung)	Funktion der Bodenfeuchte	Speichererkaskade	vereinfacht	Akkumulation und Schmelze	Bodenspeicher, Grundwasserspeicher	Speicherrouting	mittel	deutsch / ja	mittel	ja/ -
PREVAH	wissenschaftlich, operationell	Vorhersage, Klimawandel	kontinuierlich	Stunde	Hydrological Response Units	N, T, Luftfeuchte, Wind, G, Sonnenscheindauer	Funktion der Bodenfeuchte	Speicher	ja	Gradtagverfahren, Energiebilanz	Bodenspeicher, Grundwasserspeicher	Translation, Re-ention	mittel bis hoch	deutsch / ja	mittel	ja / -
SES	wissenschaftlich, operationell	Vorhersage	kontinuierlich	Stunde	Raster	N, T, Luftfeuchte, Wind, G	Funktion der Schneeverhältnisse	Nash-Kaskade	Energiebilanz	Energiebilanz; Schnee/Firn; Interne Prozesse	Nash-Kaskade	Nash-Kaskade	mittel bis hoch	deutsch / ja	mittel	-
TOPMO-DEL	wissenschaftlich	Wasserbilanz	kontinuierlich	Stunde	Raster	N, PET	Topografischer Index, Green-Ampt	Translation, Retention	-	-	-	Translation, Re-ention	mittel	englisch / ja	mittel	-

Software	Anwender	Anwendung	Modelltyp zeitlich	kleinste zeitl. Aufl. Lösung	Modelltyp räumlich	Hydrometeor. Eingangsdaten	Abflussbildung	Abflusskonzentration	Gletscher	Schnee	Grundwasser	Flussrouting	Datenaufwand	Sprache / Manual	Einarbeitungsaufwand	Weiterentwicklung/Support
TUW-HBV	wissenschaftlich	Wasserbilanz	kontinuierlich	Minute	Teilgebiete, Zonen	N, T, (PET)	Funktion der Bodenfeuchte	Speicher	–	Gradtagverfahren	Bodenspeicher, Grundwasserspeicher	Translation, Retention	mittel	englisch / ja	gering	ja / -
WasSIM	wissenschaftlich, Ingenieurbüro	Vorhersage, Bemessung	kontinuierlich	Minute	Raster	N, T, Luftfeuchte, Wind, G	Green-Ampt, Richards-Gleichung	Kinematische Welle, Vereinfachungen	Gradtagverfahren, Energiebilanz	Gradtagverfahren, Energiebilanz	Darcy Grundwassermodell	Kinematische Welle	hoch	deutsch / ja	hoch	ja / ja
WMS	Ingenieurbüro	Bemessung	Ereignis	Minute	Teilgebiete, Zonen	N	HEC-1, Anbindung an HEC-HMS möglich, einfache amerikanische Verfahren	Einheitsganglinie, u.a.	–	–	–	mit externem HEC-RAS möglich	mittel	englisch / ja	gering	ja / ja
ZEMO-KOST	Ingenieurbüro	Bemessung	Ereignis	Minute	Teilgebiete, Zonen	N	Abflusswertkonzept, Abflussprofilltypen	Laufzeitverfahren	–	–	–	Translation	mittel, Begehung wichtig	deutsch / ja	gering	ja / ja

7.3.2. Siedlungswasserwirtschaft

Tab. 7.2 Softwarevergleich Siedlungswasserwirtschaft

Software	Anwendung	Anwender	Modelltyp zeitlich	Modelltyp räumlich	Hydrometeor. Eingangsdaten	Abflussbildung	Abflusskonzentration	Schnee	Grundwasser	Kanalberechnung	Datenaufwand	Sprache/Manual	Einarbeitungsaufwand	Weiterentwicklung/Support
City Drain	Bemessung	wissenschaftlich, Ingenieurbüro	Ereignis	Teilgebiete	Niederschlag	Verluststraten	Speicher-kaskade, Muskingum	nein	nein	Speicher-kaskade oder Muskingum	gering	englisch/ ja	mittel	ja/ ja
HYKAS	Bemessung, Langzeit-simulation	Ingenieurbüro	Ereignis + kontinuierlich	Teilgebiete	N, PET	Verluststraten, Horton, CS	Speicher-kaskade	nein	nein	Saint Venant	mittel bis hoch	deutsch/ ja	mittel	ja/ ja
HYSTEM-EXTRAN	Bemessung	Ingenieurbüro	Ereignis	Teilgebiete	Niederschlag	Verluststraten	Einheitsganglinie	nein	nein	Saint Venant	mittel bis hoch	deutsch/ ja	mittel-hoch	ja/ ja
KAREN	Bemessung	Ingenieurbüro	Ereignis	Teilgebiete	Niederschlag	Verluststraten	Einheitsganglinie	nein	nein	Translation	gering	deutsch/ ja	gering	ja/ ja
KOSIM	Bemessung, Langzeit-simulationen	Ingenieurbüro	kontinuierlich	Teilgebiete	Niederschlag	Verluststraten	Speicher-kaskade	nein	nein	Kalinin-Miljukov (Translation, Retention)	gering	deutsch/ ja	mittel	ja/ ja
MIKE URBAN	Bemessung	Ingenieurbüro	Ereignis + kontinuierlich	Teilgebiete	Niederschlag	Verluststraten	Zeiflächendiagramm, Speicher-kaskade, 2D hydrodynamisch	nein	nein	Saint Venant	mittel bis hoch	englisch/ ja	hoch	ja/ ja
SWMM	Bemessung	wissenschaftlich, operationell	Ereignis + kontinuierlich	Teilgebiete	Niederschlag	Horton, Green-Ampt und SCS	Kinemat. Welle	ja	nein	Saint Venant	mittel bis hoch	englisch/ ja	mittel	ja/ ja

7.4. Datenquellen in Österreich

7.4.1. Hydro-meteorologische Daten

Zur Modellierung werden Stations- oder Flächendaten (z. B. Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Verdunstung, Wasserstand und Abfluss, Angaben zu Grundwasserverhältnissen) verwendet. Sie dienen als Eingangsgrößen, zur Kalibrierung, Validierung und Plausibilisierung (z. B. Ausaperungsmuster) (siehe auch Kapitel 2., Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen).

Da Einzugsgebietsgrenzen nicht immer exakt mit politischen Grenzen (Gemeinde, Bezirk, Länder, Staat) übereinstimmen und insbesondere die EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) mit Flussgebietseinheiten arbeitet, kann auch die Bearbeitung von „grenzüberschreitenden Einzugsgebietsdaten“ vorkommen und größeren Aufwand in der Datenbeschaffung bzw. Vergleichbarkeit der Daten verursachen. Da es sich bei derartigen Projekten meist um Aufträge der Ämter der Landesregierungen handelt, können die Hydrographischen Dienste (HD) der Länder in diesen Fällen die Rolle der Datendrehscheibe bzw. Datenvermittler übernehmen. Tab. 7.3 gibt Kontakt bei den Hydrographischen Diensten an, bei denen bearbeitete und geprüfte Daten zur Modellierung bezogen werden können.

Daten sind außerdem zu beziehen bei der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), 1190 Wien, Hohe Warte 38, Tel.: +43 1 36026, E-Mail: dion@zamg.ac.at.

Tab. 7.3 Bezugsquellen für hydro-meteorologische Stations- und Flächendaten (Kontakte bei den Hydrographischen Diensten)

Bezeichnung	Adresse	Link	Email	Telefon
HD Burgenland	Europaplatz 1 7000 Eisenstadt	https://wasser.bglld.gv.at	post.a5-wasser@bglld.gv.at	+43 2682 600/6524
HD Kärnten	Flatschacher Straße 70 9020 Klagenfurt	https://wasser.ktn.gv.at/hydrographie	abt12.post@ktn.gv.at	+43 50 536/32041
HD Niederösterreich	Landhausplatz 1, Haus 13 3109 St. Pölten	http://www.wasserstand-niederoesterreich.at , www.noel.gv.at/wasserstand	post.bd3@noel.gv.at	+43 2742 9005/13526
HD Oberösterreich	Kärntner Straße 12 4020 Linz	http://hydro.ooe.gv.at	gh.www.post@ooe.gv.at	+43 732 7720/12412
HD Salzburg	Michael-Pacher-Str. 36 5020 Salzburg	https://www.salzburg.gv.at/wasser/hydr , https://www.salzburg.gv.at/dienststellen/abteilungen/207/20704	hochwasserdienst@salzburg.gv.at	+43 662 8042/4304
HD Steiermark	Wartingergasse 43 8010 Graz	http://www.wasserwirtschaft.steiermark.at/cms/Ziel/4651108/DE/	hochwasserdienst@stmk.gv.at	+43 3 16 877/2014
HD Tirol	Herrengasse 1-3 6020 Innsbruck	https://www.tirol.gv.at/umwelt/wasser/wasserkreislauf	hydrographie@tirol.gv.at	+43 512 508/4251
HD Vorarlberg	Josef-Huter-Straße 35 6900 Bregenz	http://www.vorarlberg.at/vorarlberg/wasser_energie/wasser/wasserwirtschaft/weitereinformationen/wasserkreislauf-hydrograp/onedaten_niederschlag-.htm	wasserwirtschaft@vorarlberg.at	+43 5574 511/27441
HD Wien	Am Kaisermühlendamm 132 1120 Wien	https://www.wien.gv.at/umwelt/gewaesser/schutz/hydrografie/index.html	post@ma45.wien.gv.at	+43 4000/96561
Via Donau Österreichische Wasserstraßengesellschaft m.b.H	Donau-City-Straße 1 1220 Wien	http://www.viadonau.org	office@viadonau.org	+43 50 4321/1000
BMNT, Abteilung I/4 Wasserhaushalt (Hydrographisches Zentralbüro)	Marxergasse 2 1030 Wien	https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserkreislauf/hydrographie_oesterreich.html	wasserhaushalt@bmnt.gv.at	+43 1 71100/606942

Der Hydrographische Dienst in Österreich betreibt ein Basismessnetz zur Beobachtung der wesentlichsten Komponenten des Wasserkreislaufs. Die Daten werden vom Beginn der elektronischen Erfassung der jeweiligen Parameter bis zum jeweils aktuell veröffentlichten Hydrographischen Jahrbuch von Österreich auf <https://ehyd.gv.at> zum Download bereitgestellt. Die gedruckten Hydrographischen Jahrbücher von 2004 bis 2012 mit allen darin enthaltenen Auswertungen finden Sie unter https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserkreislauf/hydrographische_daten/jahrbuecher.html zum Download. Ab dem Berichtsjahr 2014 enthält das gedruckte Jahrbuch eine ausführliche hydrographische Beschreibung der Wasserbilanzkenngrößen Niederschlag, Abfluss und Grundwasser. Die Auswertungen des Jahresberichtes in der gewohnten Jahrbuchform können über eine Internetapplikation, die in Zusammenarbeit der Hydrographie im BMNT und dem Umweltbundesamt entwickelt wurde, abgerufen werden: <https://wasser.umweltbundesamt.at/hydjb>. Sofern nicht vergriffen, können einzelne gedruckte Jahrbücher über die Abteilung I/4 – Wasserhaushalt im BMNT (Tel.: +43-1-71100-606942 oder per E-Mail: wasserhaushalt@bmnt.gv.at) bestellt werden.

Eine weitere hydro-meteorologische Datenquelle ist der vom BMNT herausgegebene „Hydrologische Atlas Österreichs“ (HAÖ). Die aus 52 Kartentafeln mit insgesamt 100 Karten bestehende Grundlageninformation für hydrologische und wasserwirtschaftliche Untersuchungen ist beim Österreichischen Kunst- und Kulturverlag (Freundgasse 11, 1040 Wien, E-Mail office@kunstundkulturverlag.at) zu beziehen. Um die Inhalte des HAÖ für eigene Analysen direkt zugänglich zu machen, wird die analoge Lieferung durch eine digitale, GIS-basierte Version auf CD-ROM ergänzt, die alle Datensätze zu den Karten mit ausführlicher Beschreibung in einem offen zugänglichen Format (ESRI Shapefiles) enthält. Darüber hinaus sind weitere ausgewählte Daten, wie z. B. repräsentative Zeitreihendaten und die Anbindung an den eHYD-Internet-Zugang des BMNT möglich. Detaillierte Informationen zu allen verfügbaren Karten und zum digitalen Atlas sind unter <http://www.boku.ac.at/iwhw/hao> zu finden.

Für operationell betriebene Vorhersagemodelle sind zusätzlich zeitlich und räumlich hochauflösende, meteorologische Analyse- und Vorhersagedaten (z. B. Lufttemperatur, Feuchte, Windgeschwindigkeit, Bewölkung, Niederschlagsmenge und -art, Schneefallgrenze, Bodentemperatur, Globalstrahlung, Windchill, Wetterradar) unter besonderer Berücksichtigung regionaler und kleinräumiger topografischer Effekte (z. B. ZAMG – Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis) sowie Online-Daten zum aktuellen Wasserstand bzw. Abfluss von großer Bedeutung. Dabei handelt es sich jedoch meist um ungeprüfte Rohdaten (Momentanwerte), die auf den Homepages der zuständigen Hydrographischen Landesdienste veröffentlicht werden.

Weitere Bezugsquellen für hydro-meteorologische Stations- und Flächendaten zur Niederschlags-Abfluss Modellierung enthält Tab. 7.4.

Tab. 7.4 Bezugsquellen für hydro-meteorologische Stationsdaten für die Niederschlag-Abflussmodellierung

Parameter	Datentyp & Messwert	Weitere Information	Zeitliche Auflösung	Datenbezugsquelle	Kosten
Niederschlag	Tagessummen	Ombrometer	Tag	HD, eHYD / ZAMG	ZAMG kostenpflichtig, HD kostenlos
	Intensitäten	Schreibgeräte	Minuten	HD, eHYD / ZAMG	ZAMG kostenpflichtig, HD kostenlos
	Niederschlagsart	flüssig, fest	Tag	ZAMG	ZAMG kostenpflichtig
	Starkregenarchiv	Festlegung nach Starkregenkriterium	15 Minuten	HD	HD kostenlos
	ÖKOSTRA	Österreichweit koordinierte Starkniederschlagregionalisierung und –auswertung (keine Zeitreihen)	Minuten, Stunden, Tage	HD, eHYD	kostenlos
	MaxModN	Maximierte Modellniederschläge (keine Zeitreihen)	Minuten, Stunden	HD, eHYD	kostenlos
	Gewichteter Bemessungsniederschlag	Gewichtung ÖKOSTRA, MaxModN (keine Zeitreihen)	Minuten, Stunden	HD, eHYD	kostenlos
	NIEDA	Anwendung in ÖWAV Regelblättern 11 und 19 (keine Zeitreihen)	Minuten	ÖWAV	kostenpflichtig
	Radardaten	zeitliche und räumliche Niederschlagsverteilung	Minuten	Austro Control	kostenpflichtig
	INCA-Analyse Daten	Integrated Nowcasting through comprehensive Analysis	Minuten	ZAMG	kostenpflichtig
Schnee	Neuschneehöhe		Tag	HD, eHYD / ZAMG / Lawinenwarndienste	ZAMG kostenpflichtig, HD kostenlos
	Schneehöhe		Tag	HD, eHYD / ZAMG	ZAMG kostenpflichtig, HD kostenlos
	Schneewasserwert		ca. Woche	HD / ZAMG	ZAMG kostenpflichtig, HD kostenlos
Lufttemperatur	Terminwerte	3 mal pro Tag	Tag	HD / ZAMG	ZAMG kostenpflichtig, HD kostenlos
	kontinuierlich		Minuten	HD / ZAMG	ZAMG kostenpflichtig, HD kostenlos
	Luftfeuchte		Minuten	HD / ZAMG	ZAMG kostenpflichtig, HD kostenlos
	Globalstrahlung		Minuten	HD / ZAMG	ZAMG kostenpflichtig, HD kostenlos
	Sonnenscheindauer		Minuten	ZAMG	kostenpflichtig
Wind	Windgeschwindigkeit		Minuten	ZAMG	kostenpflichtig
	Windrichtung		Minuten	ZAMG	kostenpflichtig
Verdunstung	Verdunstungsfanne		Tag	HD	kostenlos
Wasserstand	Oberflächengewässer		Minuten, Tage	HD, eHYD (Tag), Kraftwerksgesellschaften auf Anfrage	kostenlos
Abfluss	Oberflächengewässer		Minuten, Tage vor 1976 v.a. Monatswerte	HD, eHYD (Tag), KWgesellschaften auf Anfrage	kostenlos
Grundwasser	Grundwasserstand		Minuten, Tag, Monat	HD, eHYD (Monat), KWgesellschaften auf Anfrage	kostenlos
Quellen	Quellschüttung		Minuten, Tag, Monat	HD, eHYD (Tag)	kostenlos

7.4.2. Modell-Gebietsdaten (GIS)

Modell-Gebietsdaten (GIS) dienen zur Beschreibung der relativ unveränderlichen Eigenschaften wie z. B. Einzugsgebietsgrenzen und -flächengrößen, Relief sowie Gewässernetz und Geologie des zu modellierenden Gebiets bzw. der Fläche. Da alle österreichischen Bundesländer über ein geografisches Informationssystem mit umfangreichen Datenbanken verfügen, können viele raumrelevante Daten von den nachfolgend angeführten zuständigen Dienststellen (Stand 2018) auf Anfrage bezogen werden (siehe Tab. 7.5).

Tab. 7.5 Bezugsquellen für GIS-Daten (Kontakte bei den Hydrographischen Diensten)

Bezeichnung	Adresse	Link	Email	Telefon
Amt der Burgenländischen Landesregierung Abteilung 2 – Hauptreferat Landesplanung Referat GIS Koordination	7000 Eisenstadt, Europaplatz 1	http://geodaten.bgld.gv.at	post.a2-gis@bgld.gv.at	+43 (0) 57 600 2117
Amt der Kärntner Landesregierung Abteilung 8 – Umwelt, Wasser und Naturschutz	9021 Klagenfurt, Flatschacherstraße 70	www.kagis.ktn.gv.at	kagis@ktn.gv.at	+43 (0)50 536 18350
Amt der Niederösterreichischen Landesregierung Abteilung Hydrologie und Geoinformation	3109 St. Pölten, Landhausplatz 1	http://www.noee.gv.at/noel/Karten-Geoinformationen/Karten-Geoinformationen.html	post.bd3@noel.gv.at	+43 (0)2742-9005-14600
Amt der Oberösterreichischen Landesregierung Digitales Oberösterreichisches Raum- Informations-System [DORIS]	4021 Linz, Bahnhofplatz 1	www.doris.ooe.gv.at	doris.geol.post@ooe.gv.a	+43 (0)732 7720-12605
Amt der Salzburger Landesregierung Referat 10/04 – Geodateninfrastruktur	5020 Salzburg Michael-Pacher-Str. 36	www.salzburg.gv.at/sagis	sagis@salzburg.gv.at	+43 (0)662 8042-4388
Amt der Steiermärkischen Landesregierung Abteilung 17 – Landes- und Regionalentwicklung Referat Statistik und Geoinformation	8010 Graz, Stempfergasse 5-7	www.gis.steiermark.at	abteilung17@stmk.gv.at	+43 (0)316 877-2447
Amt der Tiroler Landesregierung Sachgebiet Landesstatistik und TIRIS	6020 Innsbruck, Heiligeiststraße 7-9	www.tirol.gv.at/tiris	landesstatistik.tiris@tirol.gv.at	+ 43 (0)512 508-3602
Amt der Vorarlberger Landesregierung - Landesamt für Vermessung und Geoinformation	6008 Feldkirch Johannitergasse 6	https://www.vorarlberg.at/vorarlberg/bauen_wohnen/bauen/vermessung_geoinformation/weitereinformationen/aufgaben_leistungen/vogis.htm	landesvermessungsamt@vorarlberg.at	+43 (0)5522-75482
Magistrat der Stadt Wien Magistratsabteilung 01 – ViennaGIS	1220 Wien Stadlauer Straße 54-56	http://www.wien.gv.at/viennagis	viennagis@post.wien.gv.at	+43 (01) 4000 71799

Oft werden aber auch zeitlich veränderte Einzugsgebietsdaten wie z. B. Landnutzungs- und Vegetationsklassen oder Gletscherflächen benötigt (siehe auch Kapitel 2.). Die SEGER-Daten (Seger 2001) des Instituts für Geographie und Regionalforschung der Universität Klagenfurt beinhalten eine Kartierung von Realraumtypen (78 Landbedeckungs- bzw. Landnutzungstypen mit Berücksichtigung hydrologisch relevanter Merkmale). Sie wurden durch visuelle Fotointerpretation von Satellitenbildern (KFA 1000, Landsat TM) und aus topografischen sowie thematischen Karten erstellt. Die Daten liegen als digitaler Vektordatensatz für ganz Österreich vor und repräsentieren den Stand zwischen 1994 und 1999 (Kohl 2011). Aktuell wird in Österreich im Projekt „Land Informations System Austria“ (LISA) an einer neuen österreichischen Datenbank zur Landbedeckung und -nutzung gearbeitet (<http://www.landinformationssystem.at/index.php/project.html>).

Tab. 7.6 Bezugsquellen für GIS-Daten

Datentyp	Name	Datenquelle	Kosten (Stand 2018)	Kontakt
Grundkarte	ÖK M 1:50.000	BEV	z. B. Auflösung 1016 dpi Farbbild: € 0,15/km ²	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Schiffamtgasse 1-3 1020 Wien www.bev.gv.at , Tel: 01 21110-2160, E-Mail kundenservice@bev.gv.at
Orthofoto	Orthofoto Farbe	BEV	z. B. Auflösung 1 m € 0,2/km ²	BEV
Geländemodell	Höhenraster 5 x 5 m oder gröber	BEV	Höhenraster 5 x 5 m € 3,00/km ² + Versand;	BEV
Geländemodell	Höhenraster 10 x 10 m	https://www.data.gv.at	Höhenraster 50 x 50m: kostenlos kostenlos	https://www.data.gv.at/katalog/dataset/b5de6975-417b-4320-afdb-eb2a9e2a1dbf+EZL http://www.geoland.at/
Landschaftsmodell	Landschaftsmodell-Gewässer DLM-G	BEV	€ 0,02/km ² + Versand	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Schiffamtgasse 1-3, 1020 Wien, Tel: 01 21110-2160, E-Mail kundenservice@bev.gv.at
Geländemodell	Höhenraster 1 x 1 m oder gröber	GIS Abteilungen der Länder	Länderspezifisch	sh. Tabelle GIS Abteilungen der Länder http://www.data.gv.at
Gewässernetz	EU Berichtsgewässernetz	BMNT, Umweltbundesamt	projektabhängig	Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Abteilung I/3: Abteilung Nationale und internationale Wasserwirtschaft, Stubenring 1, 1010 Wien
Gewässernetz und Einzugsgebietsgliederung	Hydrologischer Atlas	BMNT	ca. € 500	Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Freundgasse 11, 1040 Wien E-Mail office@kunstundkulturverlag.at http://www.geologie.ac.at/
Geologie	Geologische Karte M 1:200.000	Geologische Bundesanstalt	ca € 300 je Blatt. Abhängig von Anzahl der Polygone für B, NO, OÖ, S, V	
Geologie	Geologische Karte M 1:50.000	Geologische Bundesanstalt	ca € 500 – 2500 je Blatt. Abhängig von Anzahl der Polygone	Ämter der Landesregierung oder http://www.geologie.ac.at
Geologie	Geologische Karte M 1:50.000 online	Geologische Bundesanstalt	Ansicht kostenlos	http://www.geologie.ac.at/
Hydrogeologie	Hydrogeologische Karte M 1 : 50.000 online	Geologische Bundesanstalt	Ansicht kostenlos	http://www.geologie.ac.at/
Boden	Bodenkarte M 1:50.000 landwirtschaftlich genutzte Böden	BFW	auf Anfrage	Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft Seckendorff-Gudent-Weg 8, A-1131 Wien, Tel.: +43-1-878 38-1213, E-Mail: michael.wandl@bfw.gv.at
Boden	ebod - digitale Bodenkarte landwirtschaftlich genutzter Böden	BFW	Ansicht kostenlos, Daten auf Anfrage, 1-km-Raster kostenlos	https://bfw.ac.at/rz/bfwcms2_web?dok=7066
Boden	Bodenkarte Waldinventur	BFW	auf Anfrage	http://bfw.ac.at/
Boden	Bodenübersichtskarte Hydrologischer Atlas	BMNT	ca. € 500	Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Freundgasse 11, 1040 Wien E-Mail office@kunstundkulturverlag.at
Landnutzung und Vegetation	CORINE 1990-2012	European Environment Agency	kostenlos	https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-corine
Landnutzung und Vegetation	SEGER Landnutzungsdaten	Institut für Geographie und Regionalforschung Universität Klagenfurt		Institut für Geographie und Regionalforschung, Universität Klagenfurt
Landnutzung und Vegetation	BFW Waldlayer	BFW	auf Anfrage	https://bfw.ac.at/rz/bfwcms_web?dok=7222
Gletscher	Gletscherkataster 1997 und 2006	Österreichische Kommission für Glaziologie	kostenlos	http://www.glaziologie.at/gletscherinventar.html
Schneebedeckung	MODIS 500 x 500 m Schneebedeckung	NASA Distributed Active Archive Center		http://nsidc.org/data/modis/order_data.html
Hochwasser	Hochwasser-Überflutungsflächen HORA	BMNT, WW Abteilungen der Länder	kostenlos	Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus: https://hora.gv.at
Hochwasser	Gefahrenzonenpläne	BMNT, WW Abteilungen der Länder	kostenlos	Wasserwirtschaftsabteilungen der Länder
Hochwasser	HQ30 und HQ100 Hochwasser-Überflutungsflächen	BMNT, WW Abteilungen der Länder	kostenlos	Wasserwirtschaftsabteilungen der Länder

7.4.3. Sonstige Informationsquellen

Ereignisdokumentationen: Die systematische Erfassung von Naturkatastrophen durch öffentliche Institutionen hat in Österreich dazu geführt, dass heute Datenbanken und Zeitreihen existieren, die allgemeine Aussagen über Gefahren und Risiken zulassen. In den letzten Jahrzehnten haben verschiedene Organisationen in ihrem Zuständigkeitsbereich die Aufgabe der Ereignisdokumentation entwickelt und wahrgenommen. Dazu zählen die Wildbach- und Lawinerverbauung, die Geologische Bundesanstalt, das Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, die Österreichischen Bundesbahnen und die Universität für Bodenkultur Wien.

Link: <http://www.naturgefahren.at>

Stifts- und Gemeindechroniken: Chroniken, Dokumentationen und Archive können Wissen über vergangene Katastrophen enthalten.

Hochwassermarken und Archivdaten der Hydrographischen Dienste (HDs): Die HDs verfügen neben systematischen Daten zum Teil auch über Angaben zu historischen Hochwasserereignissen, die zur Rekonstruktion von Extremereignissen herangezogen werden können (Kontakt Daten siehe Kapitel 7.4.1.).

Phänologische Daten bzw. Beobachtungen: Diese Beobachtungen werden von den Wetterdiensten schon seit Längerem erhoben und liefern Informationen über den Jahresgang bzw. charakteristische Zeitpunkte (Blüte, Reife, Ernte etc.) von Vegetationsarten. Auf der Seite http://zacost.zamg.ac.at/phaeno_portal werden auch Informationen zu den Daten angeboten.

7.5. Datenquellen im europäischen Raum bzw. Internet

Über österreichische Datenquellen hinausgehend lässt sich im Internet eine Vielzahl von Daten finden. Von der EU werden zahlreiche Erdbeobachtungsdaten zur Verfügung gestellt, darunter auch hydrologisch relevante Daten wie z. B. Bodenfeuchtedaten, die täglich wiederkehrend beobachtet werden (<https://earth.esa.int/web/guest/pi-community/news/-/article/improved-smos-soil-moisture-products-released-to-users> oder <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos>).

Weitere hydrologisch relevante Daten, z. B. auch Daten des Europäischen Erdbeobachtungsprogramms (Global Monitoring for Environment and Security GMES), können unter dem Begriff „open data“ <http://gmesdata.esa.int/web/gsc/home>, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home> oder <https://open-data.europa.eu/de/data/> gefunden werden.

Die EU hat in der Initiative 2007/2/EC die Einrichtung einer „Infrastructure for Spatial Information in the European Community“ (INSPIRE) <http://inspire.ec.europa.eu/#> mit dem Ziel der Einrichtung einer gemeinsamen Plattform für umweltrelevante Daten mit Vereinbarung eines Daten- und Metadatenformats beschlossen. Im Rahmen dieser INSPIRE-Richtlinie veröffentlichen die EU-Mitgliedstaaten laufend neue Daten (überwiegend kostenlos) im Internet. Über den Link <http://inspire-geoportal.ec.europa.eu> gelangt man zum Datenportal und zur Übersicht der vorhandenen Daten.

Zugang zu nationalen Daten für Österreich bietet das Portal <http://geometatensuche.inspire.gv.at> oder <https://www.data.gv.at/suche/?sort=abc>

Im EU-Projekt SWITCH-ON (Sharing Water-related Information to Tackle Changes in the Hydrosphere for Operational Needs, Grant agreement no: 603587), das 2017 abgeschlossen wurde, ist ebenfalls ein Datenportal speziell für hydrologische Daten bereitgestellt: <http://water-switch-on.eu>.

8. Synthesebeispiele zur praktischen Anwendung des Leitfadens mit Checklisten

Präambel

Dieses Kapitel setzt sich aus Synthesebeispielen zur praktischen Anwendung des Regelblattes für drei Einzugsgebiete zusammen. Das Ziel dieser Beispiele ist es zu zeigen, wie für eine konkrete Anwendung die einzelnen Teile des Regelblattes zusammenwirken. Die drei Synthesebeispiele sind:

- (1) Der Rumpelgraben in Salzburg.
- (2) Die Pram in Oberösterreich.
- (3) Der Weerbach in Tirol.

Die drei Beispiele ergänzen einander in mehrerer Hinsicht. Zum einen unterscheiden sie sich in den naturräumlichen Gegebenheiten. Der Rumpelgraben ist ein typischer kleiner Wildbach, die Pram besitzt ein ländliches Einzugsgebiet, und der Weerbach hat ein alpines Einzugsgebiet, das deutlich größer als das des Rumpelgrabens ist. Zum anderen unterscheiden sich die Beispiele in der Datenlage. Der Rumpelgraben besitzt die dürtigste Datenlage, denn im Gebiet befindet sich kein Pegel. Die Datenlage der Pram und des Weerbaches ist deutlich besser. Außerdem unterscheiden sich die Beispiele im Umfang der Bearbeitung. Insbesondere wurden für den Weerbach drei verschiedene Modelle verglichen, um die Spanne der Möglichkeiten zu zeigen. Bei einem praktischen Projekt würde man sich vermutlich auf ein einziges Modell konzentrieren, wie dies für die Pram der Fall ist. Die für den Rumpelgraben gewählte Vorgangsweise, etwa das Heranziehen von Faustformeln und synthetischen Ganglinien, ist speziell in kleinen Wildbächen der Wildbach- und Lawinenverbauung üblich und findet in anderen Einzugsgebieten in der Regel keine Anwendung. Schließlich unterscheiden sich die Beispiele in Hinblick auf die Hydrologischen Kategorien (Schadenspotenzial und Komplexität der hydrologischen Verhältnisse), wobei der Rumpelgraben der HK1 bis HK2 zuzuordnen ist, Pram und Weerbach der HK2.

Zu besserer Lesbarkeit wurde bei den Überschriften der drei Synthesebeispiele die Kapitelnummer „8“ weggelassen. Damit entspricht die Kapitelnummer in jedem der Beispiele exakt der zugehörigen Nummer in den Kapiteln 1. bis 7. des Regelblattes. Auch die Boxen werden mit exakt der gleichen Nummerierung angegeben, wobei – wiederum zur besseren Lesbarkeit – nur die relevanten Boxen erwähnt werden.

Zur Unterstützung einer systematischen Bewertung der Qualität der Modellierung sind den Synthesebeispielen ausgefüllte Checklisten beigefügt. Ein Leerformular der Checkliste steht auf www.oewav.at/publikationen zum Download zur Verfügung. Die Checkliste dient

- zur Darstellung der Projektsanforderungen für Auftragsvergaben vor Projektbeginn (Planung der Modellierung) sowie
- zur Darstellung der Durchführung der Modellierung und der Qualität der Ergebnisse bei Projektende (Abschlussprüfung).

Die Checkliste schließt mit einer übersichtlichen, zusammenfassenden Gesamtbewertung der Qualität der Niederschlag-Abfluss-Modellierung und des damit verbundenen Aufwandes.

Synthesebeispiel Rumpelgraben

Autoren: Johannes Hübl und Markus Moser

1. Aufgabenstellung

Der Rumpelgraben ist ein rechtsufriger Zubringer des Angerbaches, der wiederum im Ortsteil Anger, Gde. Bad Hofgastein, in die Gasteiner Ache mündet. Das Einzugsgebiet hat eine Fläche von 1,41 km², das Gerinne weist eine Lauflänge von rund 1,9 km bei einer Höhendifferenz von ca. 1000 m auf.

Im Beispiel soll der Basis-Bemessungswert für ein 100-jährliches Ereignis berechnet werden, der für die Dimensionierung von technischen Schutzmaßnahmen herangezogen wird (**Box 1.1**). Als Leitprozess wird Murgang angenommen, wodurch sich der Bemessungswert für das Bemessungsereignis durch entsprechende Zuschläge noch wesentlich (Intensitätsfaktor > 3,5) vergrößern kann. Änderungen in der Landnutzung, klimatische Veränderungen und die Wirkung von Schutzmaßnahmen werden nicht berücksichtigt. Da es sich um eine einfache wasserwirtschaftliche Fragestellung (Ganglinien für Geschiebetransport) mit geringem bis mittlerem Schadenspotenzial und einfachen hydrologischen Verhältnissen handelt, wird gemäß **Box 1.2** die hydrologische Klasse 1 bis 2 festgelegt.

2. Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen

2.1. Gebietsüberblick und Gebietseigenschaften

Die Beschreibung der Gebietseigenschaften des Einzugsgebiets folgt den Empfehlungen der **Box 2.1** und **Box 2.2**.

2.1.1. Landschaftliche Einordnung

Das Einzugsgebiet des Angerbaches befindet sich im Gasteinertal, südöstlich von Bad Hofgastein. Der Angerbach, dessen größter Seitenbach der Lafenbach ist, verläuft von Südwesten nach Nordosten und mündet bei Bad Hofgastein in die Gasteiner Ache. Die Gebirgskette, die das Einzugsgebiet begrenzt, erstreckt sich vom Stubnerkogel (2246 m) – Tischkogel (2409 m) – Zittauer Tisch (2463 m) – Ortberg (2401 m) im Osten, zum Kl. Silberpfennig (2510 m) – Silberpfennig (2600 m) – Baukarlscharte (2492 m) – Gadauner Höhe (2447 m) im Süden und über den Mitterastenkopf (2401 m) – Kalkbretterkopf (2412 m) – Stanzscharte (2098 m) zur Türchlwand (2577 m) im Westen. Die nördliche Begrenzung bildet die Gebirgskette Sieben-spitz – Lungkogel (Abb. 8.1).

Wesentliche Zubringer des Angerbaches sind der Lafenbach, der Winkelkarbach, der Schattbach, der Obere Rumpelgraben und der Rumpelgraben (Tab. 8.1).

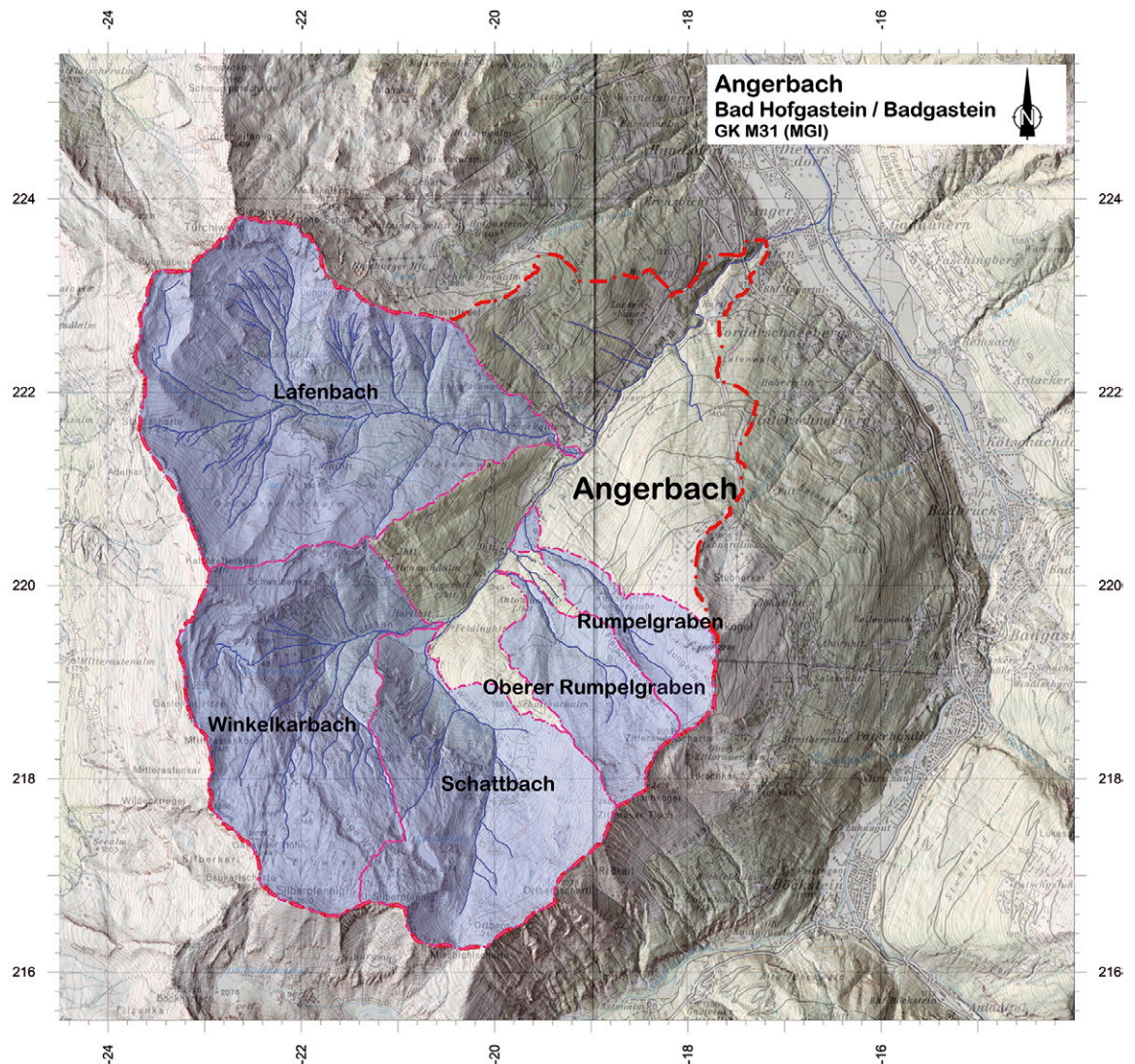


Abb. 8.1 Einzugsgebiete des Angerbaches mit den maßgeblichen Zubringern

Tab. 8.1 Flächen der Einzugsgebiete des Angerbaches

Einzugsgebiet	Einzugsgebietsfläche [km ²]
Angerbach gesamt	34,5
Lafenbach	9,64
Winkelkarbach	7,22
Schattbach	5,34
Oberer Rumpelgraben	1,88
Rumpelgraben	1,41

Der Rumpelgraben mündet rechtsufrig in den Mittellauf des Angerbaches. Mit einer Länge von 2700 m und einer Breite von 800 m kann das Einzugsgebiet als langgestreckt bezeichnet werden, das durchschnittliche Gefälle beträgt 16 Prozent. Das obere Einzugsgebiet wird durch die Linie Stubnerkogel und Zittauer Scharte begrenzt (Abb. 8.2). Die südwestliche Begrenzung bildet der Fleischleitenriegel, eine markante nordöstliche Begrenzung fehlt.



Abb. 8.2 Blick nach Südosten in das Einzugsgebiet des Rumpelgrabens

Der untere Bachabschnitt gehört zur Gemeinde Bad Hofgastein, Katastralgemeinde Vorder-schneeberg, der obere Teil des Einzugsgebietes (ungefähr ab der Waldgrenze) zum Gemein-degebiet Bad Gastein, Katastralgemeinde Bockstein.

Auf der Jungeralm auf 1750 m ü. A. vereinigen sich etliche kleine Quellbäche zum Rumpelgra-ben, der anschließend in eine tief eingeschnittene Steilstrecke übergeht. Dieser Gerinneab-schnitt ist sehr grobblockig, seitliche Rutschungen stellen ein großes Geschiebepotenzial dar. An die Steilstrecke (Abb. 8.3) schließt bereits das Kegelgerinne an, das nur gering ausgebildet ist. Den Ablagerungskegel dominieren Ablagerungen von zum Teil sehr grobblockigen Mur-gängen. Murköpfe und Levées finden sich am ganzen Kegel, das Größtkorn misst rund 10 m³.

Das Sammelgebiet (hydrografisches Einzugsgebiet, Abb. 8.4) umfasst eine Fläche von 1,31 km². Das morphologisch stark geprägte Ablagerungsgebiet mit einer Fläche von 0,1 km² reicht bereits bis in den Mittellauf unter Bildung eines Kegelhalses (~hm 6,0). Gemäß Forst-gesetz 1975 zählen die Fläche des von einem Wildbach und seinen Zuflüssen entwässerten Niederschlagsgebiets sowie der Ablagerungsbereich zum Einzugsgebiet des Wildbaches.

Dieses beträgt für den Rumpelgraben somit 1,41 km². Der Rumpelgraben kann als Wildbach des Hochgebirges (Salzer 1886), als Altschuttwildbach (Stiny 1931) und als Wildbach in Restschuttkörpern (Bunza 1982) klassifiziert werden.

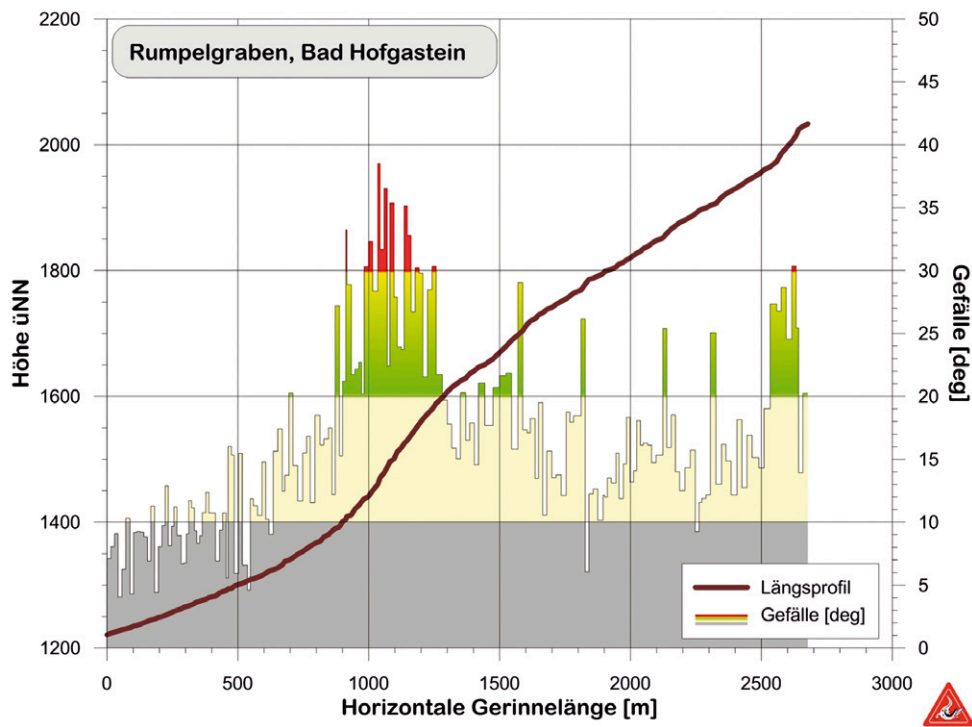


Abb. 8.3 Längsprofil und Gefälleverhältnisse Rumpelgraben

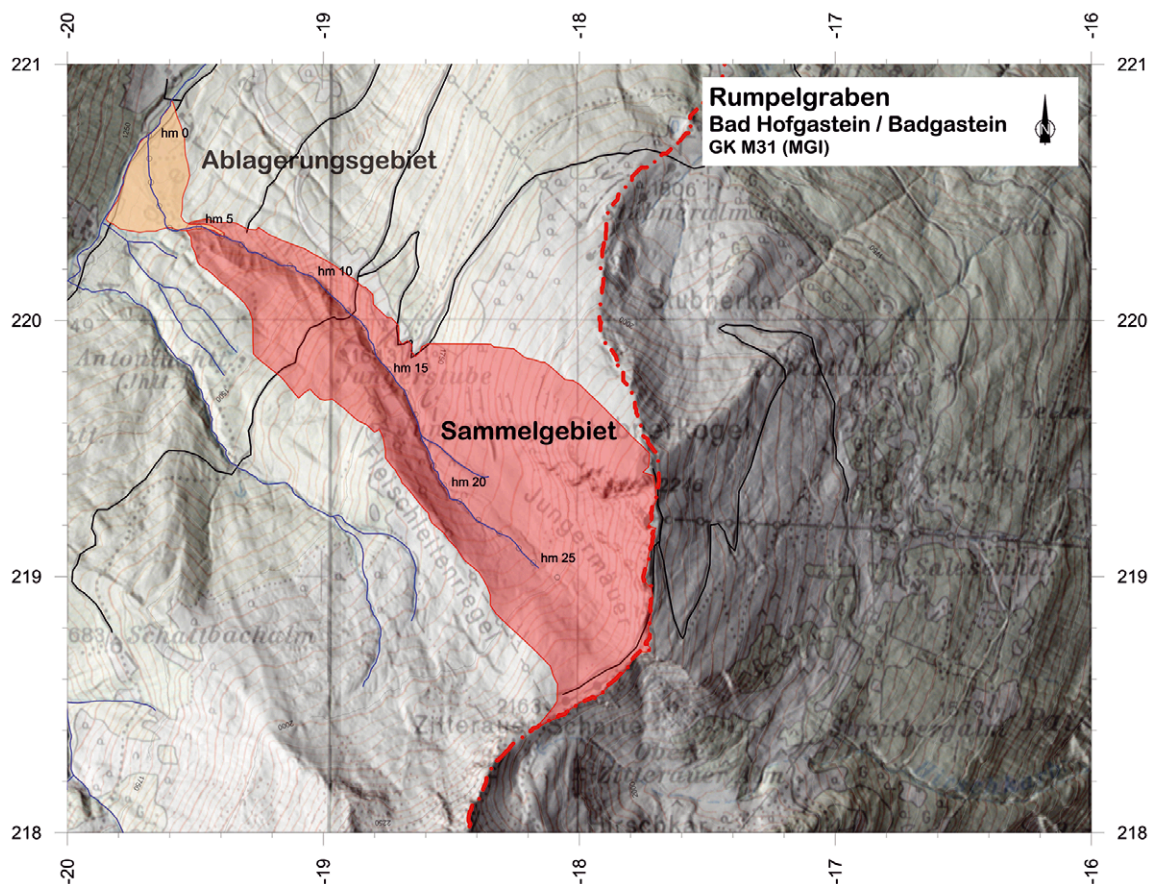


Abb. 8.4 Sammel- und Ablagerungsgebiet des Rumpelgrabens (Einzugsgebiet) (Quelle der Basiskarte: BMNT)

2.1.2. Topografie, Gewässernetz, wasserwirtschaftliche Maßnahmen

Das Höhenmodell des Einzugsgebietes basiert auf ALS-Daten mit einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 Metern und bildet die Grundlage der Darstellung aller weiteren Gebietsdaten.

2.1.3. Geologie, Boden

Das Untersuchungsgebiet liegt im zentralen Abschnitt des Tauernfensters. Auf der liegenden autochthonen bis paraautochthonen unteren Schieferhülle findet man über dem Zentralgneis (als tektonisch tiefstem Bestandteil des Tauernfensters) Jungpaläozoikum, Trias (Quarzit, geringmächtig Dolomit und Rauwacke) und darüber Kalkglimmerschiefer, Kalkmarmor und Schwarzphyllit (Jura bis Unterkreide). Das Deckensystem der oberen Schieferhülle besteht zum Großteil aus Kalkglimmerschiefer mit mächtigen Grünschiefer einschaltungen und darüber tonreichen Serien der oberen Schwarzphyllitzone. Im Unterschied zur unteren Schieferhülle findet man in der oberen nur wenig triasische Gesteine (Exner 1957, Abb. 8.5).

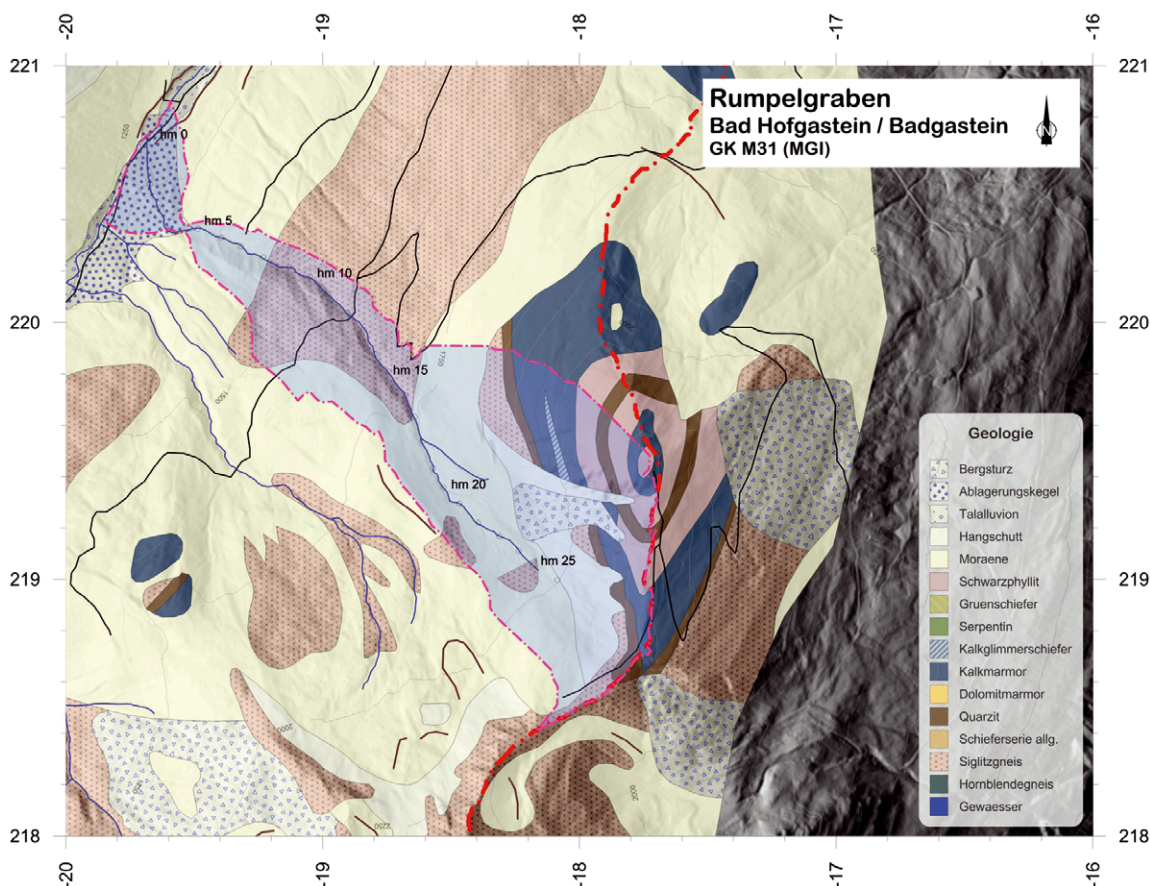


Abb. 8.5 Geologische Karte des Einzugsgebietes (Exner 1957, modifiziert)

Das Sammelgebiet des Rumpelgrabens ist durch Sedimente der Eiszerfallsphase (Würm) morphologisch geprägt (Abb. 8.6). Die höchstgelegene Eisrandterrasse findet sich auf rund 1500 m ü. A. mit einer Mächtigkeit von mindestens 200 m. Morphologisch sehr auffallend ist der Erosionsansatz der tief eingeschnittenen Seitengraben sowie Vernässungen und Quellaustritte am Top der Ablagerung.

Mehrere Meter mächtige zusammenhängende Aufschlüsse zeigen, dass geschichtete Sand-Kiesgemische (GSs), geschichtete und massive Sande (Sb und Sm) sowie geschichtete Diamikte (Dms) die typischen vorgefundenen Lithofazien sind.

Diese Ablagerungen sind die Quelle für die sehr aktive Wildbachschüttung in diesem Gebiet im Angertal. Eine mögliche Grundmoränenbedeckung der gesamten Abfolge ist im gesamten

Bereich aufgrund der hohen Erosion durch die Seitenbäche schwer feststellbar und nicht eindeutig (Bichler 2015). Weitere spät- und postglaziale Ablagerungen finden sich in den Karen und im Talbereich des Angerbaches.

Folgende Lockergesteine können im Bereich des Rumpelgrabens unterschieden werden:

- **Hangumlagerungssedimente:** Junge Ablagerungen, die durch Verwitterungsvorgänge der am Standort anstehenden Locker- und Festgesteine gebildet werden und durch Bodenkriechen, Abpflungen etc. umgelagert wurden (Feinkorn dominiert).
- **Moränenablagerungen:** weitgestufter Gesteinsschutt, der vom Gletscher an dessen Basis (Grundmoräne) oder an dessen Rand (Seitenmoräne) abgelagert wurde.
- **Eisrandsedimente:** Eisrandsedimente, die an die Ränder der abschmelzenden Gletscher geschüttet wurden. Anschnitte in den Grabeneinhängen zeigen dort matrixgestützte, relativ locker gelagerte Diamikte (weitgestufte strukturlose matrixgestützte, schluffige, blockige Sand-Kies-Stein-Gemische mit überwiegend kantigen bis kantengerundeten Komponenten), wobei die Matrix aus Grobschluff bis Grobsand besteht. Dieser Sedimenttyp passt zum Environment eines abschmelzenden Gletschers, wo Moränenmaterial und die Verwitterungsdecke des anstehenden Festgesteins in Form von Murgängen über kurze Distanzen umgelagert wird und dementsprechend relativ regellos vorliegt. Das in der Fachliteratur als proximales Eisrandsediment bezeichnete Material bedeckt das Festgestein an der projektrelevanten Hangflanke in mehreren 10er-Metern-Mächtigkeiten und bildet entsprechend den Rückzugsstadien des abschmelzenden Gletschers auf rd. 1360 m ü. A. und 1450 m ü. A. im Landschaftsbild erkennbare Terrassenkörper.
- **Fluviatile Bachsedimente:** Junge postglaziale Sand-Kies-Stein-Gemische des Angertalbaches und seiner Zubringer mit Komponenten, die hauptsächlich aus dem Tauernfenster stammen. Die Komponenten sind dominant angerundet.

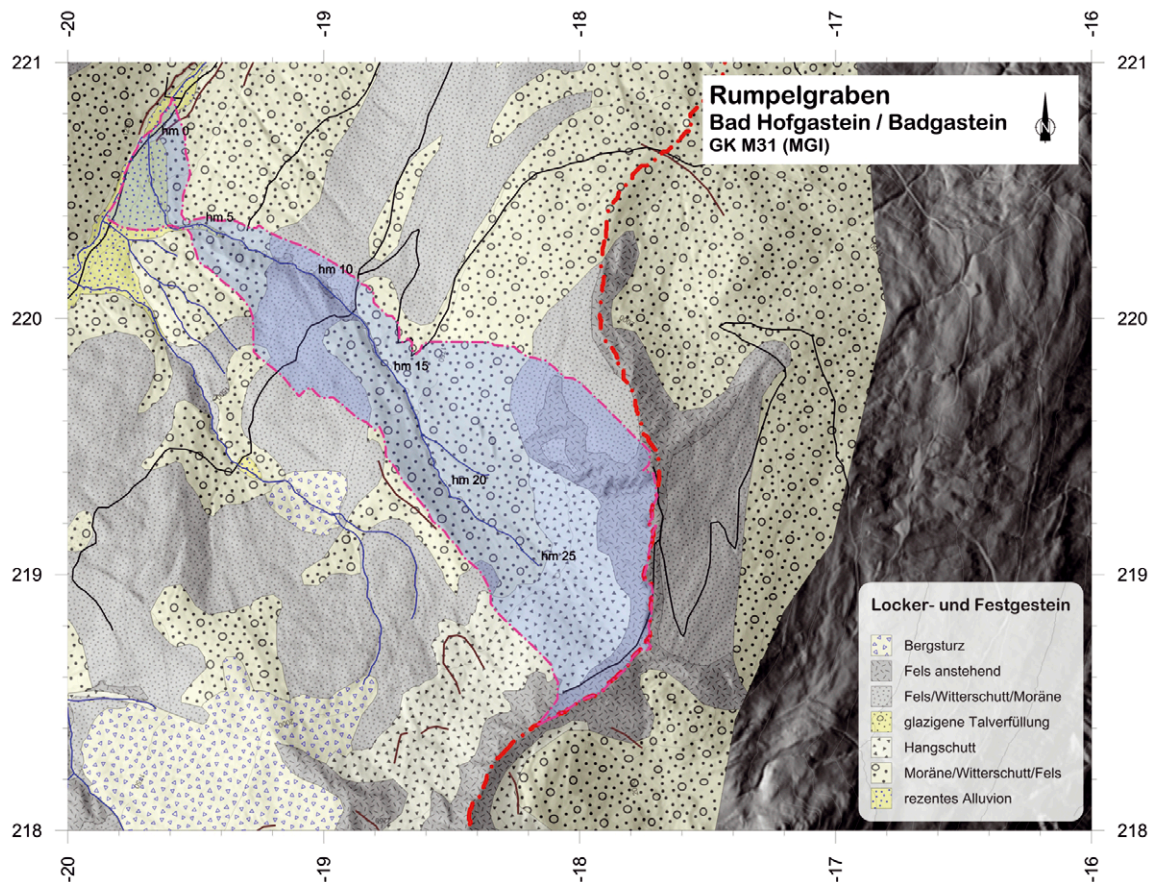


Abb. 8.6 Glaziale, postglaziale und rezente Ablagerungen im Einzugsgebiet

2.1.4. Vegetation, Landnutzung

Das Einzugsgebiet des Rumpelgrabens erstreckt sich über einen Seehöhenbereich von ca. 1200 bis zu 2250 m Seehöhe. Bis auf 1650 m ü. A. überwiegt forstliche Nutzung, darüber finden sich Almflächen, die zum Teil im Winter als Skiabfahrten genutzt werden (Abb. 8.7).



Abb. 8.7 Charakteristik im oberen und mittleren Einzugsgebiet

An Waldgesellschaften finden sich:

- *Subalpiner Fichtenwald*: Diese Waldgesellschaft bildet bei ca. 1750 m die Waldgrenze. Unmittelbar darüber befindet sich die Kampfzone (Baumgrenze ca. 1800 – 1850 m), die sehr unterschiedlich ausgeprägt ist.
- *Montaner Fichtenwald mit Grauerle*: Vorwiegend im Steilabfall zum Lafenbach findet man diese Dauergesellschaft, wo sie die immer wieder entstehenden Hanganbrüche in diesen sehr steilen und infolge Hangwasserzug und Quellaustritten extrem vernässten und somit labilen Bereichen besiedelt. Dieser Typ ist meist kleinflächig vertreten und weist eine plenterartige Struktur auf.

Betrachtet man die Altersstruktur der Bestände, so ist ein ausgeprägter Altholzüberhang festzustellen. Der Grund dafür liegt in der sehr schwierigen Bringungssituation. Außerdem weisen besonders die Jungwuchsflächen erhebliche Verbiss-Schäden auf und das Aufkommen von Naturverjüngung fehlt nahezu gänzlich.

Teile des Einzugsgebiets werden im Sommer als Weidefläche, im Winter als Skipiste genutzt. Damit verbunden sind Änderungen in der Morphologie und der Rauigkeit der Oberfläche. Die Skipisten werden in regelmäßigen Abständen (alle 50 bis 100 m) durch offene Gräben entwässert. Diese Oberflächenwässer werden durch kleine zwischengeschaltete offene Retentionsbecken dosiert auf Grünland abgeleitet und anschließend über den Grabeneinhang in den Rumpelgraben abgeführt.

Einige Forststraßen durchziehen das Einzugsgebiet und queren den Rumpelgraben, so auf 1570 m, 1650 m und auf rund 1800 m ü. A.

2.1.5. Kombinierte Informationen: Abflussdisposition, Abflussbeiwerte

Das obere Einzugsgebiet zeigt aufgrund der landwirtschaftlichen und skitouristischen Nutzung und des Bodenaufbaus eine erhöhte Abflussdisposition. Moränenmaterial und forstliche Nutzung im Mittel- und Unterlauf verbessern hingegen die Infiltrationseigenschaften. Nur der linksufrige Einhang des Unterlaufs zeigt einen hohen Bergwasserspiegel an, wodurch in diesem Bereich mit höheren Abflüssen zu rechnen ist (**Box 2.2**).

2.2. Niederschlag und andere meteorologische Größen

Das Gasteinertal ist ein Nord-Süd-verlaufendes Tal im Nordabfall der Hohen Tauern und liegt dadurch im Einflussbereich der zentralalpiner Nordstaulage. Im Sommer herrschen Nordwestwetterlagen vor. Durch die Beckenlage wird das Klima im Winter kontinentaler. Die Situation für das Einzugsgebiet wird besonders kritisch, wenn ein vom Oberpinzgau nach Südosten ziehendes Gewitter durch eine vorherrschende Staulage stationär wird (Neumayr 1999).

Vom gesamten Jahresniederschlag fallen im Durchschnitt 76 % als Regen und 24 % als Schnee (fester Niederschlag). Die maximale Schneehöhe liegt in einer Höhe von 1800 m ü. A. bei ca. 180 cm. Die durchschnittliche Schneedeckendauer beträgt hier 187 Tage (Bad Gastein, Messzeitraum von 1959 bis 1990).

Die Winde folgen im Wesentlichen den Talverläufen (Talwinde). Die aus Süden einfallenden Winde erreichen als Föhnstürme sehr hohe Windgeschwindigkeiten. Ebenso können lokal, aufgrund der Düsenwirkung morphologischer Gegebenheiten, sehr hohe Windgeschwindigkeiten auftreten.

2.2.1. Erhebung und Auswahl von Stationsdaten

Im Einzugsgebiet befindet sich keine hydrografische Messstation. Für den Niederschlag eines Bemessungsereignisses werden deshalb Stationen aus der Umgebung (**Box 2.3**) herangezogen (Abb. 8.8) und die Auswertungen mit den Daten aus eHYD verglichen.

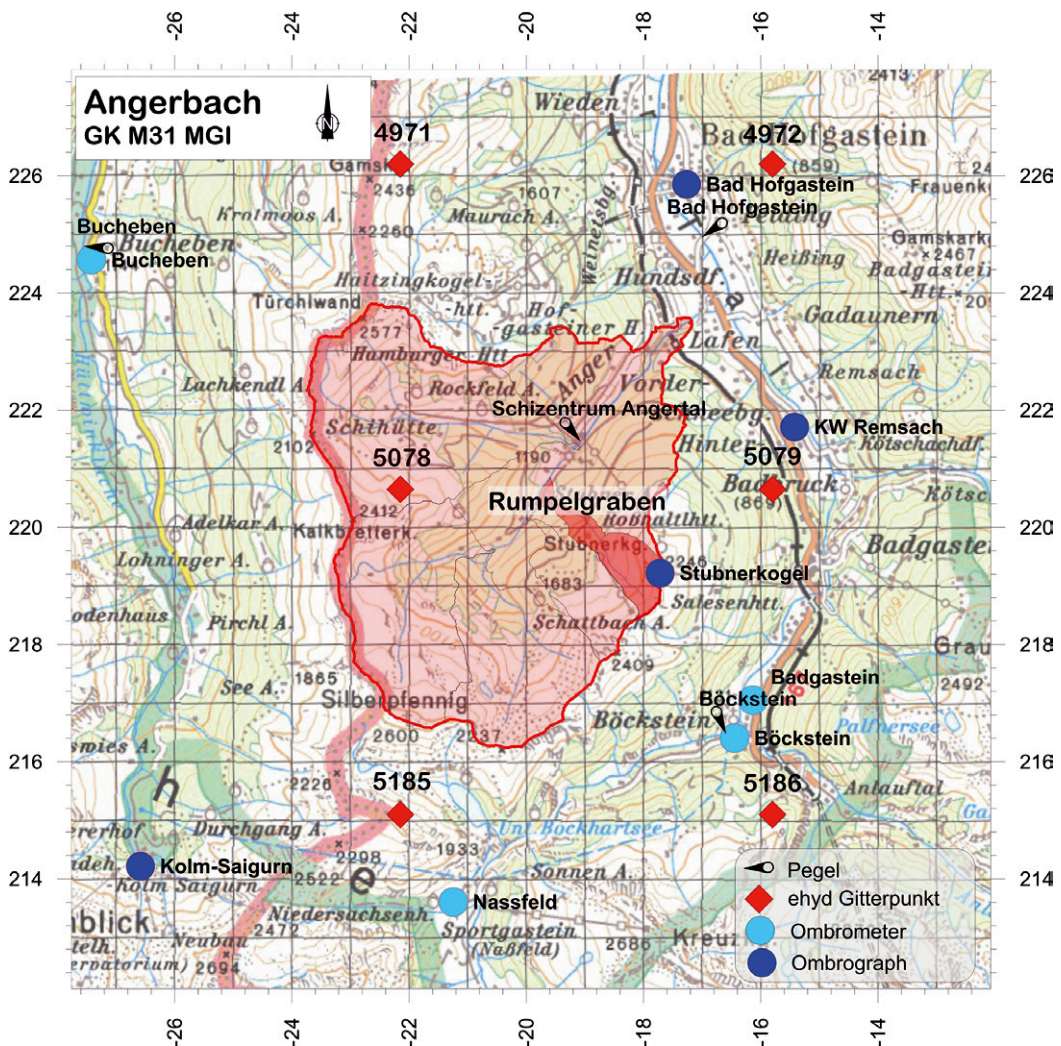


Abb. 8.8 Niederschlags- und Pegelstationen in der Umgebung des Angertales sowie Modellgitterpunkte eHYD

2.2.2. Datenprüfung und Korrektur

Für die Niederschlagsauswertung wurden die vom HD Salzburg veröffentlichten Daten verwendet und können als geprüft angesehen werden (**Box 2.4**).

2.2.3. Niederschlagsstatistik und Bemessungsniederschläge

Für eine extremwertstatistische Auswertung (EV I – Gumbel) stehen langjährige Messreihen von Tageswerten von Stationen zur Verfügung, die jedoch alle im Tal situiert sind (Tab. 8.2). Deshalb sind die Daten für die betreffende Höhenlage nur eingeschränkt repräsentativ.

Tab. 8.2 Verwendete Stationen für die Niederschlagsstatistik

Station	HZB-Nr.	Aufzeichnungszeitraum	Höhe ü. A.
Badgastein	103630	1871 – 2004	1100
Böckstein	103622	1909 – 2004	1140
Bucheoben	103580	1901 – 2004	1034

Tab. 8.3 Extremwertstatistische Auswertung der Tagesniederschläge h_N (EV I Gumbel). n ist die Jährlichkeit, KIV das 5%-Konfidenzintervall

Station	n [a]	h_N [mm/d]	KIV 5% [mm/d]
Badgastein	30	100,0	10,0
	50	107,9	11,4
	100	118,6	13,3
Böckstein	30	99,6	11,3
	50	107,0	12,9
	100	117,1	15,1
Bucheoben	30	82,1	8,3
	50	87,8	9,5
	100	95,6	11,1

Wie zu erwarten, zeigen die extrapolierten Daten der Stationen Badgastein und Böckstein fast idente Werte. Die Ergebnisse von Bucheoben liegen etwa 20 Prozent darunter (Tab. 8.3).

Bemessungsniederschläge

Für das Einzugsgebiet des Angerbaches werden für die Bemessung die Werte der Gitterpunkte 4971, 4972, 5078, 5079, 5185, 5186 nach eHYD gemittelt. Sowohl die MaxModN- als auch die Bemessungswerte nach eHYD liegen weit über den statistisch ermittelten Werten. Für die Ermittlung des Gebietsniederschlags werden die Bemessungswerte nach eHYD (Tab. 8.4, Abb. 8.9) herangezogen (**Box 2.5**).

Tab. 8.4 Zusammenstellung der Niederschlagsvarianten für „mittlere Bemessungsniederschläge“ aus eHYD

h_N [mm]	Jährlichkeit						
t [min]	10	20	25	30	50	75	100
5	11,6	13,6	14,2	14,7	16,2	17,4	18,2
10	19,5	23,0	24,1	25,0	27,6	29,6	31,1
15	24,2	28,7	30,1	31,2	34,5	37,1	38,8
20	27,2	32,2	33,8	35,0	38,7	41,6	43,7
30	31,6	37,3	39,2	40,6	44,9	48,2	50,6
45	35,8	42,1	44,2	45,8	50,5	54,2	56,8

h_N [mm]	Jährlichkeit						
t [min]	10	20	25	30	50	75	100
60	38,8	45,6	47,8	49,5	54,5	58,5	61,3
90	43,2	50,6	52,9	54,8	60,2	64,5	67,6
120	46,4	54,1	56,6	58,6	64,2	68,7	71,9
180	51,6	60,0	62,6	64,7	70,8	75,7	79,1
240	56,0	64,8	67,6	69,9	76,4	81,5	85,1
360	68,0	78,7	82,0	85,0	92,8	99,0	103,5
540	82,7	95,7	99,8	103,4	112,9	120,5	126,0
720	93,6	107,9	112,6	116,4	127,2	135,7	141,9
1080	105,1	119,6	124,0	127,8	138,3	147,0	153,0
1440	115,0	129,4	134,0	137,8	148,3	157,5	164,0
2880	141,2	157,2	162,2	166,5	178,2	187,3	193,8
4320	157,9	176,8	183,1	187,5	200,6	211,0	217,8
5760	169,4	191,9	198,1	203,2	217,3	228,5	236,1
7200	178,5	203,2	210,4	215,8	230,8	242,6	250,6
8640	185,9	212,2	220,2	226,5	242,3	254,5	262,8

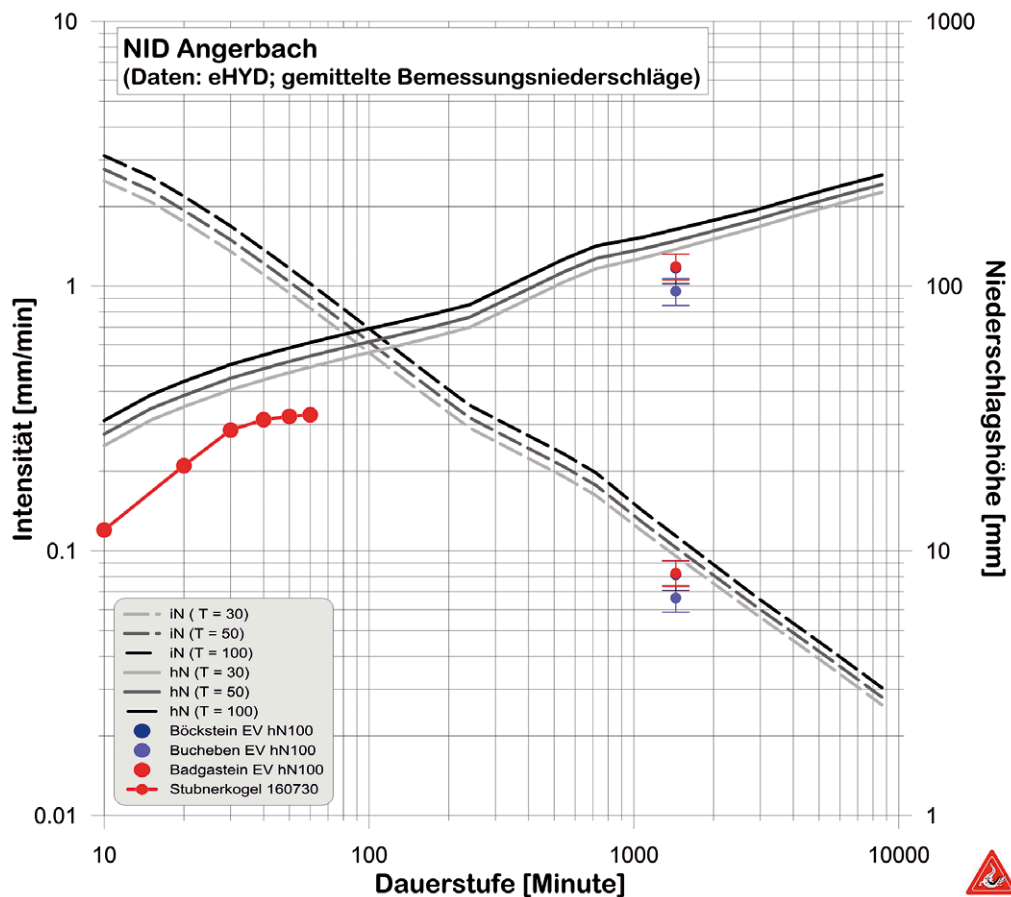


Abb. 8.9 Niederschlagsintensitäten (strichlierte Linie) für „eHYD mittlere Bemessungswerte“ (Mittelwerte der Gitterpunkte 4971, 4972, 5078, 5079, 5185, 5186 sowie die 100-jährlichen Tagesniederschläge (Punkte mit Balken) der Stationen Badgastein, Bockstein und Bucheben), ergänzt mit den höchsten gemessenen Niederschlagshöhen am Stubnerkogel beim Ereignis 2016 (rote Linie) für verschiedene Dauerstufen.

2.2.4. Zeitliche Verteilung des Ereignisniederschlags

Die kürzeste Anstiegszeit bei einer Lauflänge (schräge Länge) von 2800 m errechnet sich bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit im Gerinne von 2,0 m/s mit einer Dauer zwischen 20 und 25 Minuten. Deshalb wird eine zeitliche Auflösung zwischen 1 und 5 Minuten für die Abflussermittlung als nötig erachtet. Entsprechend der Aufgabenstellung werden deshalb die Dauerstufen 20, 30 und 60 Minuten berücksichtigt (**Box 2.6**). Es wird angenommen, dass der Niederschlag gleichförmig in der gewählten Dauerstufe verteilt ist (Blockniederschlag, Tab. 8.5).

Tab. 8.5 Zusammenstellung der maßgeblichen Niederschläge der Jährlichkeit 100 Jahre

Variante	Dauerstufe [min]	Summe [mm]	Intensität [mm/min]	Intensität [mm/h]
1	20	43,7	2,18	131,3
2	30	50,6	1,69	101,2
3	60	61,3	1,02	61,3

2.2.5. Räumliche Verteilung des Niederschlags

Aufgrund der geringen Fläche des Einzugsgebietes könnten die MaxModN-Werte mit einer sehr starken Abminderung oder die Bemessungswerte ohne Abminderung zur Anwendung kommen (Abb. 8.9). Für den Gebietsniederschlag werden die Bemessungswerte ohne Abminderung herangezogen (**Box 2.7**). Stau- und Aufgleiteneffekte werden nicht berücksichtigt. Für den Gebietsniederschlag gelten daher die Werte der Tab. 8.5 (**Box 2.8**).

2.3. Abfluss

2.3.1. Erhebung und Auswahl von Stationsdaten

Im Einzugsgebiet des Rumpelgrabens gibt es keine Abfluss-Messstation. Im Vorfluter Angerbach wurde im Jahr 1995 im Rahmen eines Forschungsprojekts eine Abflussmessstelle eingerichtet, die derzeit von der Salzburg AG betrieben wird. Da der dominierende Prozess im Einzugsgebiet der Prozessstyp Murgang ist, sind die vorhandenen Referenzprofile nicht repräsentativ (**Box 2.10**).

2.3.2. Datenprüfung und Korrektur

Die Stationsdaten des Abflusspegels Skizentrum Angertal (Salzburg AG) sind Rohdaten. Sie wurden nur auf Plausibilität kontrolliert, eine Datenprüfung wurde nicht durchgeführt (**Box 2.11** und **Box 2.12**).

2.3.3. Ereignisdokumentation

Ereignis am 19. Juni 2006 im Lafenbach

Im Teileinzugsgebiet Lafenbach (siehe Abb. 8.1) ist ein Ereignis am 19. Juni 2006 dokumentiert (**Box 2.13**). Zur Analyse der Niederschläge wurden Daten der umliegenden Niederschlagsmessstationen des Hydrographischen Dienstes Salzburg und Wetterradardaten der Austro Control angefordert, um die flächige Verteilung des Niederschlags im Einzugsgebiet zu bestimmen. Die Daten der Austro Control lagen mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten vom 19.6.2006 16:00 MEZ bis 19.6.2006 22:00 MEZ im Raster 1018,6 x 1018,6 m vor. Die daraus berechneten Niederschlagshöhen schwanken für den Ereigniszeitraum zwischen 10 und 14 mm. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu Augenzeugenberichten, die von einem extrem starken gewittrigen Niederschlag zwischen 19:15 MEZ und 21:00 MEZ im Einzugsgebiet berichteten. Auf der Gadauner Hochalm wird das Niederschlagende mit 21:00 MEZ-Wert angegeben, vom Ortsteil Anger die höchste Intensität des Niederschlags mit ca. 22:00 MEZ. Die Zugrichtung wurde einheitlich mit W–O beschrieben. Ganz allgemein sprachen alle Befragten

von einem außergewöhnlich heftigen Gewitter, das es in dieser Stärke noch nie bzw. schon sehr lange (> 50 Jahre) nicht mehr gegeben hat. In höheren Lagen (höher als ~2000 m) lagen noch Schneefelder. Im Bereich der Gadauner Hochalm wurde während des Ereignisses leichtes Graupeln beobachtet, es kam aber zu keiner Neuschneebildung (Abb. 8.10).



Abb. 8.10 Das obere Einzugsgebiet des Lafenbaches am 20. Juni 2006

Die Null-Grad-Grenze lag über der Höhe des Einzugsgebiets. Eine Schauerzelle ist auf den Radarbildern weiter südwestlich im Raurisertal sichtbar, eine weitere bildet sich fast zeitgleich im Bereich von Badgastein. Dort befindet sich auch die Niederschlagsmessstelle KW Remsach des HD Salzburg. Diese liefert eine hochauflösende nicht äquidistante Zeitreihe (Abb. 8.11). Am Stubnerkogel wird nur eine geringe Niederschlagshöhe aufgezeichnet, sodass anzunehmen ist, dass die Schauerzelle nördlich vorbeizog (Abb. 8.11). Da aus dem Einzugsgebiet sonst keine weiteren Hinweise auf die Niederschlagshöhe vorhanden sind, wird der aufgezeichnete Niederschlag der Station KW Remsach als ereignisauslösender Niederschlag als bestmögliche Näherung betrachtet. Die Jährlichkeit des Niederschlags (KW Remsach) liegt unter 10 Jahren (Basis eHYD-Bemessung).

Zur Dokumentation des Abflusses stehen Pegelmessungen der Station Bad Hofgastein und am Angerbach (unterhalb der Einmündung des Lafenbaches, Skizentrum Angertal) der Salzburg AG zur Verfügung (Abb. 8.13), die den Abfluss alle 15 Minuten aufzeichnen.

Am 19.6.06 um 20:15 MEZ wurde am Pegel Angerbach noch ein Abfluss von $3,6 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen. Von 20:30 MEZ bis 20:45 MEZ stieg der Abfluss von $4,8 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $28,8 \text{ m}^3/\text{s}$ an, das bedeutet einen Anstieg des Abflusses von $24 \text{ m}^3/\text{s}$ in 15 Minuten. Der Spitzenabfluss wurde um 21:00 MEZ mit $29 \text{ m}^3/\text{s}$ registriert, der Direktabfluss endet rund 12 Stunden später. Da die Auflösung der Pegelmessstelle Angerbach nur viertelstündlich ist, kann ein noch steilerer Anstieg bzw. höherer Scheitelabfluss nicht ausgeschlossen werden (Abb. 8.11).

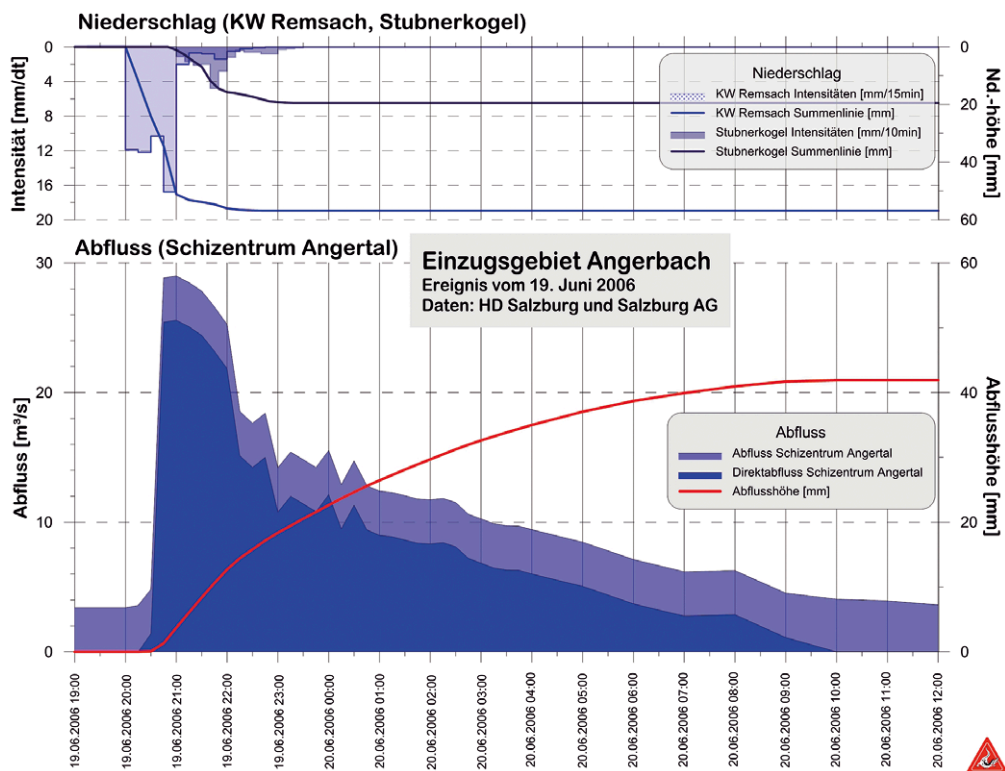


Abb. 8.11 Gemessener Abfluss (Skizentrum Angertal) und Niederschlag (KW Remsach und Stubnerkogel)

Zusätzlich wurden im Einzugsgebiet an relevanten Stellen mit stabiler Sohle (natürlich oder aufgrund technischer Einbauten) Profilmessungen mit dazugehörigen Anschlagslinien, Rauigkeiten und Längsgefälle aufgenommen. Am Schwemmkegelgerinne und im Tallauf wurden weitere Profile für die spätere Analyse des Abflusses erfasst. Bei den Erhebungen wurden auch die auftretenden Prozessformen erfasst, fotografiert und anhand von Orthofotos verortet. Parallel zu diesen Aufnahmen erfolgte eine Befragung der ortsansässigen Bevölkerung über den Hergang und die Auswirkungen des Ereignisses.

Zum Abfluss im Ortsgebiet Anger/Lafen wurden unterschiedliche Angaben gemacht. Sie bewegen sich zwischen bordvollem Abfluss (Abb. 8.12) bis hin zu 20 cm Freibord.



Abb. 12 Abflussmarken des Angerbaches im Ortsteil Anger, Bad Hofgastein

Der bordvolle Abfluss entspricht etwa 35 bis 40 m³/s und konnte an mehreren Stellen durch Fotos nachgewiesen werden. Der maximale Wasserstand des Angerbachs im Ortsteil Anger wird mit 21:00 MEZ angegeben.

Die Laufzeit der Abflusswelle vom Pegel Skizentrum Angertal bis zur Mündung in die Gasteiner Ache kann deshalb mit rund 15 bis 30 Minuten angegeben werden. Dies entspricht einer Geschwindigkeit von rund 2 – 3 m/s. Mit einer verringerten Geschwindigkeit (~ 1 m/s) müsste der Abfluss aus dem Angertal zwischen 21:30 und 21:45 Uhr beim rund 2 km gerinneabwärts gelegenen Pegel Bad Hofgastein eintreffen. Dieser zeigt einen Scheitelwert um 21:15 Uhr und einen weiteren um 22:45 Uhr (Abb. 8.13). Ersterer kann nicht auf das Ereignis im Lafenbach zurückgeführt werden, der zweite Scheitel um 22:45 Uhr scheint jedoch wesentlich vom Abfluss aus dem Angertal beeinflusst zu sein. Verschiebt man die Abflussganglinie des Angerbaches um 45 Minuten, reduziert sich der Scheitelabfluss der Gasteiner Ache zumindest um 20 m³/s.

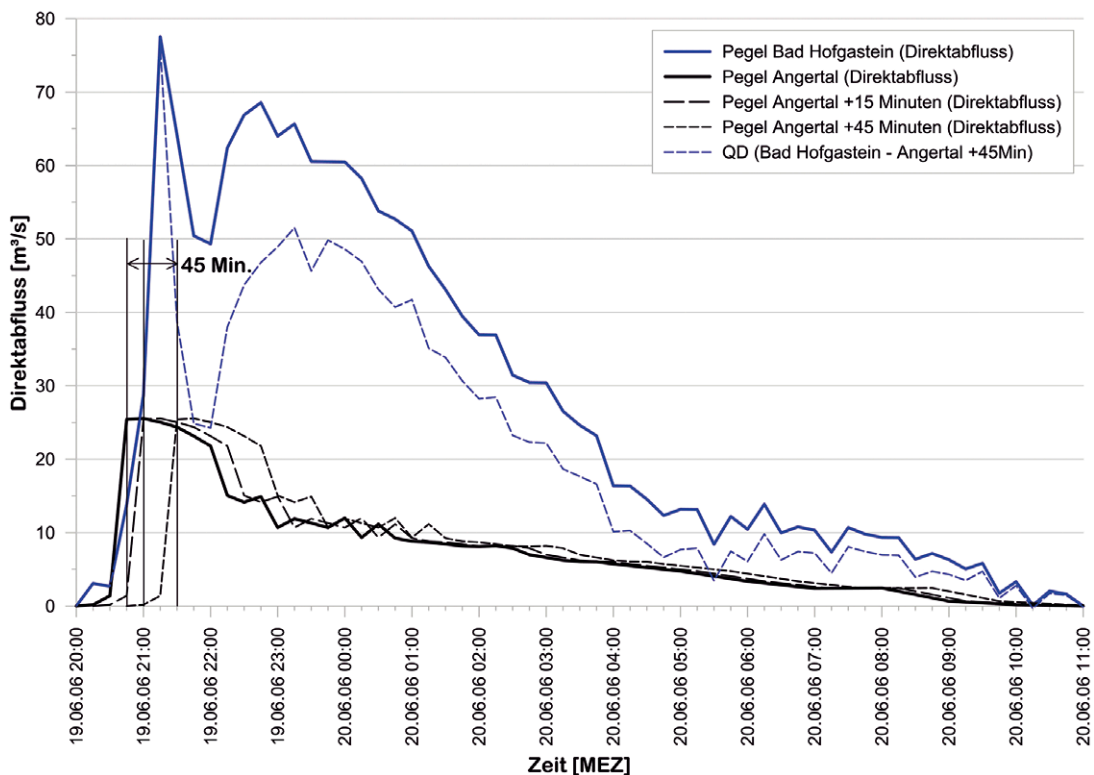


Abb. 8.13 Vergleich der Direktabflüsse an den Pegeln Bad Hofgastein und Skizentrum Angertal

Vergleicht man die Niederschlagshöhe (KW Remsach) mit der Abflusshöhe des Direktabflusses vom Lafenbach (Abb. 8.11), beträgt der Abflussbeiwert (über das gesamte Ereignis) rund 0,73. Dieser sehr hohe Wert deutet auf einen größeren Niederschlag im Einzugsgebiet hin. Weiters sind hohe Niederschlagsintensitäten erforderlich, um den sehr steilen Anstieg der Ganglinie am Lafenbach zu bewirken. Deshalb dürfte die Niederschlagssumme der Schauerzelle im oberen Einzugsgebiet größer als der gemessene Niederschlag am KW Remsach gewesen sein.

Unterstellt man eine Jährlichkeit des gemessenen Abflusses von 30 Jahren und eine dieser Jährlichkeit entsprechende Niederschlagshöhe eines 90-minütigen Niederschlags von rund 55 mm (Tab. 8.4), ergäbe sich sogar ein Abflussbeiwert von 0,76.

Zusammenfassung Abflusscharakteristik Lafenbach:

- Sehr steiler Anstieg der Ganglinie (24 m³/s in 15 Minuten)
- Anstiegszeit (time to peak): 20 – 25 Minuten
- Abfallzeit: 16 Stunden
- Scheitelwert Direktabfluss: 24,5 m³/s

- Abflussspende: 2,6 m³/s.km²
- Abflusshöhe: 42 mm
- Gebietsfaktor (α) von Wundt: 6,5

Datenprüfung: Plausibilitätsprüfung durchgeführt
 Temperatur, Verdunstung, Strahlung: nicht berücksichtigt

Ereignis am 30. Juli 2016 im Rumpelgraben

Am Nachmittag des 30. Juli 2016 führten sehr lokale Niederschläge im oberen Einzugsgebiet des Rumpelgrabens zu einem Murgang (**Box 2.13**). Beobachter auf der Jungeralm beschreiben den Niederschlag als weiße Wand, die sich oberhalb der Alm ausbildete. Obwohl schon seit Jahrzehnten auf der Alm aktiv, können sie sich an ein solches Naturereignis nicht erinnern. Die Quellbäche reagierten sehr rasch, sodass Touristen zwischen den beiden Quellbächen eingeschlossen wurden.

Die von der ZAMG zur Verfügung gestellten INCA-Datensätze liegen für 15 Minuten Zeitintervalle vor. Eine Schauerzelle zeigt sich über Badgastein (Abb. 8.14), im Bereich des Stubnerkogels ergibt sich eine Niederschlagssumme von rund 26 mm für den Zeitraum von 17:45 bis 19:00 MEZ (Abb. 8.15). Diese Niederschlagshöhe ist zumindest auch für das obere Einzugsgebiet des Rumpelgrabens anzusetzen.

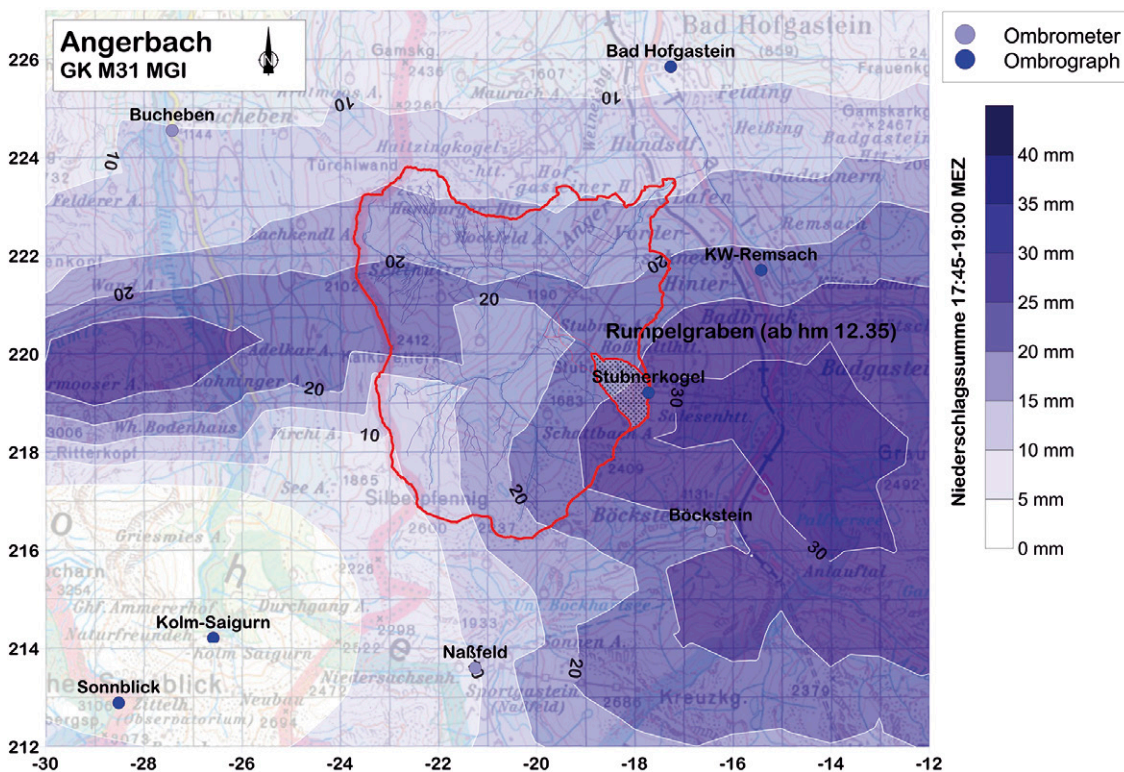


Abb. 8.14 Flächige Niederschlagsverteilung für das Ereignis vom 30. Juli 2016 für den Zeitraum von 17:45 bis 19:00 MEZ (Datenquelle (INCA); ZAMG)

Die von den Gasteiner Bergbahnen zur Verfügung gestellten Daten des Ombrometers am Stubnerkogel (Waage mit Windschutzring) weisen leider eine Lücke von 18:04 bis 18:12 Uhr wegen eines Stromausfalles auf. Ergänzt man die Datenreihe und unterstellt eine etwas höhere Intensität im fehlenden Intervall von 18:00 bis 18:10 Uhr, so errechnet sich eine Niederschlagshöhe von rund 30 mm in 30 Minuten. Dies würde etwa einer Jährlichkeit von 10 Jahren entsprechen.

Durch die exponierte Lage der Niederschlagswaage ist mit großen Verlusten bei der Niederschlagsaufzeichnung zu rechnen, da Böen mit Geschwindigkeiten über 10 m/s auftraten

(Abb. 8.15). Die Summe von 30 mm kann somit als Untergrenze des tatsächlich gefallenen Niederschlags angesehen werden. Der 5-tägige Vorniederschlag kann mit 21,2 mm angegeben werden.

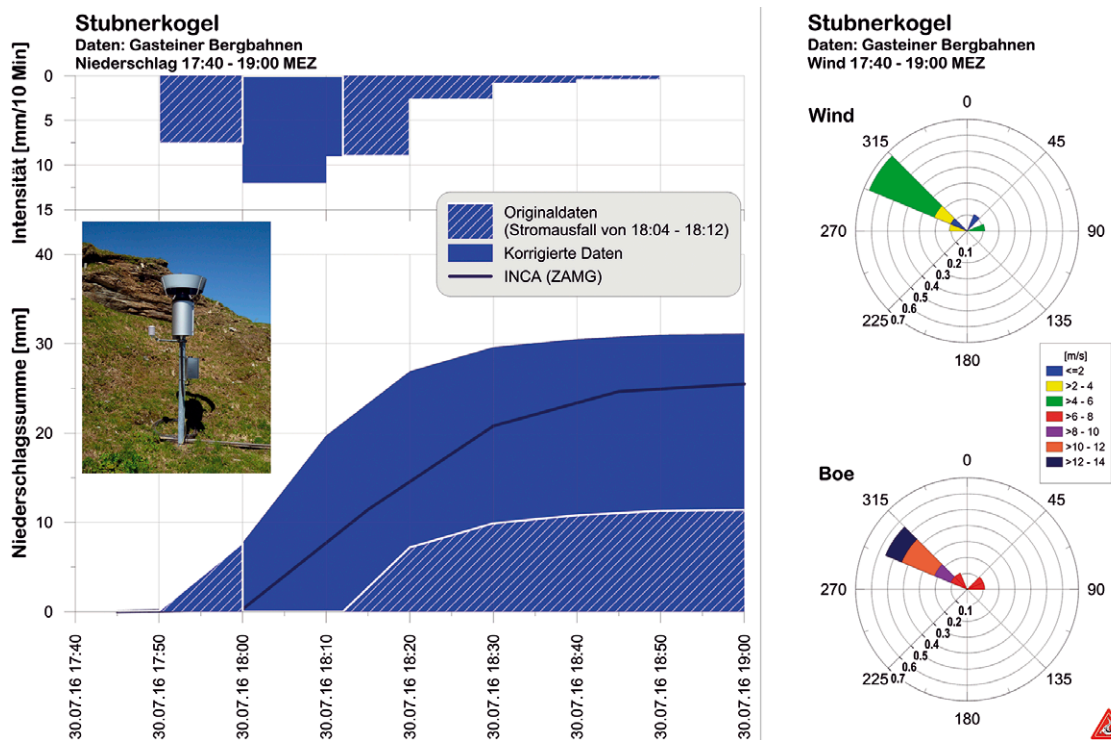


Abb. 8.15 Niederschlag und Windverhältnisse am Stubnerkogel von 17:40 bis 19:00 MEZ für den 30. Juli 2016

Vergleicht man die an der Station am Stubnerkogel aufgezeichneten Niederschläge und die INCA-Daten, zeigt sich ein ähnlicher, nur zeitlich versetzter Niederschlagsverlauf. Die Niederschlagshöhe liegt zwischen 25 und 30 mm (siehe auch Abb. 8.9) mit Intensitäten um rund 1 mm/Minute für den relevanten Zeitraum.

Im Rahmen einer Begehung konnten bei einer Straßenbrücke bei hm 12,35 noch Anschlagmarken verortet werden, die dem Ereignis zugeordnet werden können und dem Leitprozess fluvialer Feststofftransport entsprechen (Abb. 8.16). Durch den Absturz unterhalb der Brücke besteht die Möglichkeit, den Abfluss mit der Formel für einen vollkommenen Überfall (Froude < 1) zu berechnen.

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \left[\left(h + \frac{v_0^2}{2 \cdot g} \right) - \left(\frac{v_0^2}{2 \cdot g} \right) \right]^{3/2}$$

Mit einer durchflossenen Querschnittsfläche von 2,25 m² und einer angenommenen Anströmgeschwindigkeit von 2 m/s errechnet sich ein Abfluss von rund 5 m³/s (Abb. 8.16). Mit einem Einzugsgebiet von 1 km² bedeutet dies eine Abflusspende von rund 5 m³/s.km².



Abb. 8.16 Abflussquerschnitt bei hm 12,35

Rund 270 m gerinneabwärts lässt sich der Abfluss nicht mehr berechnen, da sich das Gerinne sowohl eingetieft, anschließend aber auch wieder verfüllt hat. Die seitlichen Anschlagmarken befinden sich rund 4 Meter über der Gerinnesohle und die „Stummen Zeugen“ weisen eindeutig auf einen steinigen Murgang hin (Abb. 8.17).

Abflusscharakteristik Zusammenfassung:

- Scheitelwert Direktabfluss: $5 \text{ m}^3/\text{s}$
- Abflussspende: $5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$
- Gebietsfaktor (α) von Wundt: 5



Abb. 8.17 Abflussquerschnitt bei hm 9,62; Leitprozess Murgang

2.3.4. Lokale und regionale Abflussstatistik

Zur Erstellung einer regionalen Abflussstatistik werden die Pegel Bad Hofgastein (Gasteiner Ache), Böckstein (Naßfelder Bach) und Bucheben (Hüttwinkler Ache) herangezogen (**Box 2.14**). Die statistischen Werte der Tab. 8.6 stammen aus dem Gefahrenzonenplan Bad Hofgastein (Hydrologischer Längenschnitt) sowie aus Auswertungen des HD Salzburg.

Tab. 8.6 Regionale Abflussstatistik

Pegel	Abflüsse [m³/s]			Abflussspenden [m³/s.km²]		
	Bad Hofgastein	Böckstein	Bucheben	Bad Hofgastein	Böckstein	Bucheben
HQ_{300}	272	131		1,23	2,28	
HQ_{100}	233	111	115	1,06	1,93	1,20
HQ_{30}	188	87	90	0,85	1,52	0,94
HQ_{10}	145	58		0,66	1,01	
HQ_5	119	41		0,54	0,71	

Die Abflussspenden der Pegel Bad Hofgastein und Böckstein scheinen in etwa den gleichen α -Wert nach Wundt (Gebietsfaktor GF) aufzuweisen, die Spenden des Pegels Bucheben deuten auf eine andere Gebietscharakteristik hin (Abb. 8.18).

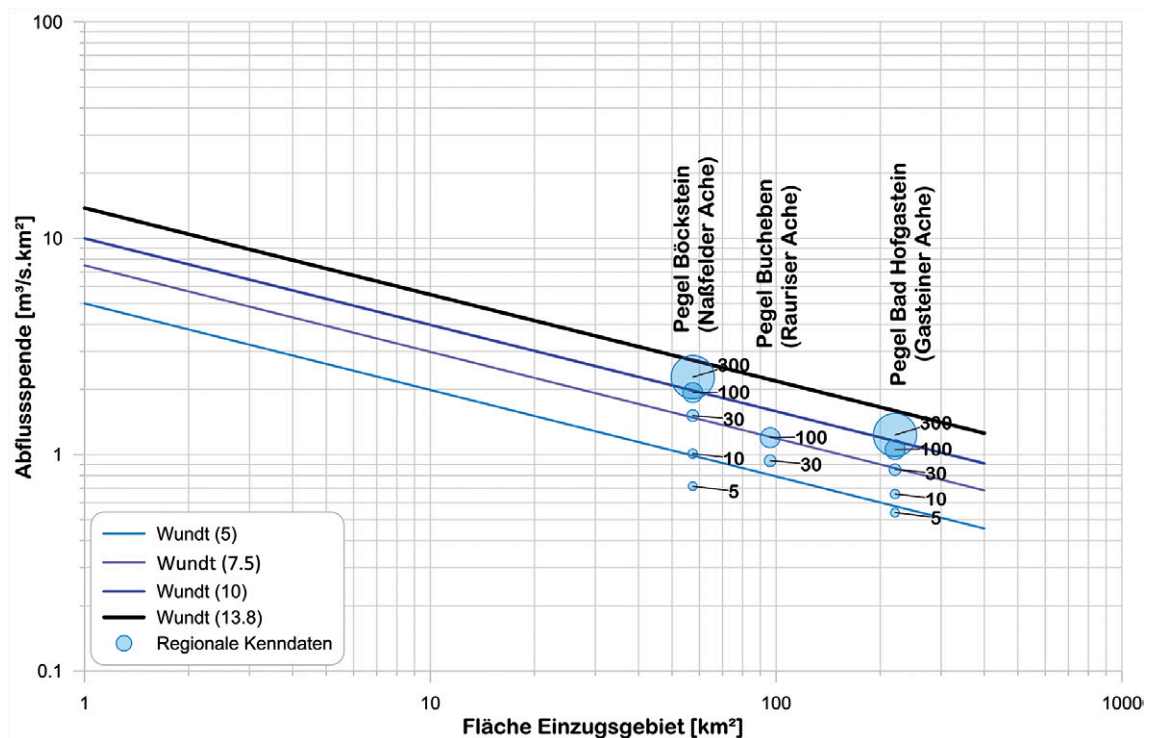


Abb. 8.18 Abflussspenden unterschiedlicher Jährlichkeit der Pegel in Tab. 8.6 (Kreise) im Vergleich zu den Hüllkurven nach Wundt mit unterschiedlichem Gebietsfaktor α

Die im Kapitel 2.3.3. beschriebenen Ereignisse am Lafenbach und Rumpelgraben wären bei der Annahme der Flächenabhängigkeit nach Wundt ($Q = \alpha \cdot A_E^{0,6}$) einer Jährlichkeit von ca. 10 bis 30 Jahren zuzuordnen. Diese geringe Jährlichkeit überrascht etwas, da Ereignisse mit den aufgetretenen Auswirkungen aus den letzten Jahrzehnten nicht bekannt sind.

3. Modellwahl (Modellkonzepte)

3.1. Kriterien für die Modellwahl

Da nur der Bemessungsabfluss zu berechnen ist, wird ein Ereignismodell verwendet. Aufgrund der Datenlage (Gebietskenndaten vorhanden, keine Abflussdaten) werden Modelle verwendet, die als Eingangswerte den Niederschlag und Gebietsdaten benötigen. Parameter zur Abflussbestimmung werden aus Boden- und Vegetationsdaten ermittelt, Parameter zur Abflusskonzentration aus topografischen Daten, Oberflächen- und Gerinnerauigkeiten. Die Modelle werden passend zur Aufgabenstellung aufgrund vorhandener Erfahrungen in der Praxis gewählt (**Box 3.1**).

Als ereignisbezogene Modelle werden HEC-HMS und ZEMOKOST verwendet.

3.2. Modelltypen und raum-zeitliche Gliederung des Modells

3.2.1. Kausalität und Modellkomplexität

Die gewählten Modelle sind den Grey-Box-Modellen zuzurechnen. Sie können die in Wildbacheinzugsgebieten auftretenden Abflussprozesse vereinfacht auf Teileinzugsgebietsbasis abbilden (**Box 3.2**).

3.2.2. Räumliche Gliederung

Die räumliche Unterteilung des Einzugsgebietes erfolgt anhand der topografischen Gegebenheiten auf Basis des Geländemodells und zahlreicher Feldbegehungen unter Berücksichtigung der Bodenarten und der Landnutzung (**Box 3.3**). Die Fließlängen, Flächenanteile und Gefällsverhältnisse werden mithilfe des ESRI arc hydro tool ermittelt (Abb. 8.19).

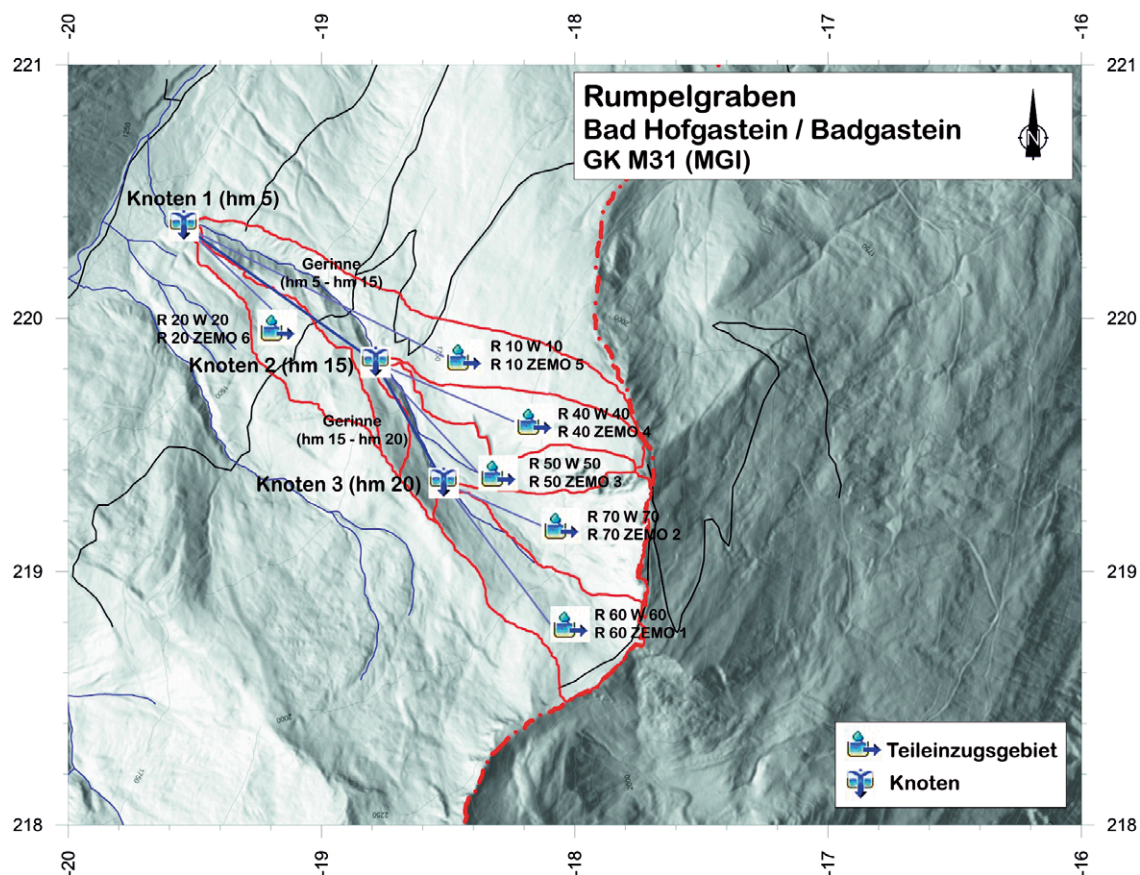


Abb. 8.19 Schematische Gliederung des Einzugsgebietes (HEC-HMS, ZEMOKOST) (Datenquelle der Basis-karte: BMNT)

3.2.3. Zeitliche Gliederung

Für die Fragestellung wird ein Ereignismodell gewählt (**Box 3.4**). In jedem Zeitschritt wird der Niederschlag für alle Teileinzugsgebiete gleich groß angenommen.

Die gewählten Dauerstufen des Niederschlags entsprechen mindestens der angenommenen Anstiegszeit, die zeitliche Diskretisierung im Modell wird mit 1 Minute gewählt.

3.3. Berechnungsansätze einzelner Prozesse in Niederschlag-Abfluss-Modellen

3.3.1. Interzeption, Verdunstung und Schnee

Die Anfangsverluste ($h_{N,Av}$) werden im SCS-Verfahren des HEC-HMS üblicherweise mit 20 % des potenziellen Speichervermögens (S) angesetzt. Untersuchungen (DVWK 1991; Jiang 2001; Hawkins 2002) zeigten aber, dass die sogenannte *initial abstraction ratio* (λ) eher mit 5 % anzusetzen ist.

$$h_{N,Av,0,05} = \lambda \cdot S_{0,05}$$

$h_{N,Av,0,05}$ Anfangsverluste für eine initial abstraction ratio von 0,05

λ initial abstraction ratio

$S_{0,05}$ potenzielles Speichervermögen bei einer initial abstraction ratio von 0,05

ZEMOKOST verwendet zur Berücksichtigung der Anfangsverluste eine Initialabstraktionszeit, die vom Abflussbeiwert (a) und der Regenintensität (i) abhängig ist. Sie wurde aus Beregnungsexperimenten abgeleitet (Kohl 2011).

$$h_{N,Av} = f(a, i, SZI)$$

a Abflussbeiwert

i Niederschlagsintensität

SZI Systemzustandindex

Für Bemessungszwecke wird ein durchschnittlich schlechter Systemzustand im Sinne eines realistisch ungünstigen Szenarios als Standardvorgabe empfohlen ($SZI = 0$). Die Anfangsverluste werden als Funktion des Abflussbeiwerts berechnet. Eine Änderung des Systemzustandindex (SZI) verlängert (+1 ... +6) oder verkürzt (−1 ... −6) die Abstraktionszeit und verändert damit die Größe der Anfangsverluste. Die Werte entsprechen der Veränderung in Minuten.

Die Verdunstung wird nicht berücksichtigt, da sie auf den Abfluss resultierend aus Starkregen keinen Einfluss hat. Die Werte für Strahlung, Temperatur, Luftfeuchte etc. werden für die verwendeten Ereignismodelle nicht benötigt (**Box 3.6**).

3.3.2. Abflussbildung

Es werden keine physikalisch basierten Modelle verwendet (**Box 3.7**).

Das SCS-Verfahren ermittelt den abflusswirksamen Niederschlag für jedes Teileinzugsgebiet mithilfe der gewählten Kurvennummer unter Berücksichtigung der Anfangsverluste (**Box 3.8**). Da die ursprünglichen SCS-Tabellen, die die Kurvennummern (CN) aus Landnutzung und Bodenart ableiten, für einen Anfangsverlust von 20 Prozent des potenziellen Speichervermögens (S) gelten, jedoch das SCS-Verfahren nach DVWK (1991) und Merz et al. (2006) mit einem Anfangsverlust von 5 Prozent des Speichervermögens zutreffender angewendet wird, sind die CN -Werte zu korrigieren. Da eine offizielle Anpassung der Kurvennummern durch das EWRI Curve Number Hydrology Task Committee noch nicht erfolgt ist, wird das Verfahren nach ASCE (NEH, Part 630 Hydrology, Chapter 10, proposed CN update vom 30. September 2017) angewendet.

$$S_{0,2} = \frac{1000}{CN_{0,2}} - 10$$

$$S_{0,05} = 1,42 \cdot S_{0,2}$$

$$CN_{0,05} = \frac{1000}{(10 + S_{0,05})}$$

$$S_{0,05} = \frac{1000}{CN_{0,05}} - 10 = 1,42 \cdot S_{0,2} = 1,42 \cdot \left(\frac{1000}{CN_{0,2}} - 10 \right)$$

$$CN_{0,05} = \frac{CN_{0,2}}{(1,42 - 0,0042 \cdot CN_{0,2})}$$

$h_{N,Av}$ Anfangsverluste [in, mm]

λ initial abstraction ratio [-]

$CN_{0,2}$ Kurvennummer für eine initial abstraction ratio von 0,2

$CN_{0,05}$ Kurvennummer für eine initial abstraction ratio von 0,05

$S_{0,2}$ potenzielles Speichervolumen für eine initial abstraction ratio von 0,2 [in]

$S_{0,05}$ potenzielles Speichervolumen für eine initial abstraction ratio von 0,05 [in]

Tab. 8.7 Umrechnungstabelle für die Kurvennummern bei unterschiedlichen initial abstraction ratios

$CN_{0,20}$	$CN_{0,05}$	$CN_{0,20}$	$CN_{0,05}$	$CN_{0,20}$	$CN_{0,05}$	$CN_{0,20}$	$CN_{0,05}$
100	100	75	67	50	41	25	19
95	93	70	62	45	36	20	14
90	86	65	56	40	31	15	11
85	79	60	51	35	27	10	7
80	73	55	46	30	23	5	3

Somit ergibt sich folgender Ansatz für die Abflusshöhe:

$$S_{0,05} = \frac{25400}{CN_{0,05}} - 254$$

$$h_{A,0,05} = \frac{\left(h_N - 0,05 \cdot 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN_{0,05}} - 10 \right) \right)^2}{h_N + 0,95 \cdot 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN_{0,05}} - 10 \right)}$$

h_N Gebietsniederschlag [mm]

h_A Abflusshöhe [mm]

S potenzielles Speichervolumen [mm]

CN Kurvennummer [-]

Zur Abgrenzung des Unsicherheitsbereichs werden in ASCE (NEH, Part 630 Hydrology, Chapter 10, proposed CN update vom 30. September 2017) für $10 < CN_{0,05} < 100$ folgende Formeln vorgeschlagen:

$$CN_{LR,0,05} = 1,1 \cdot CN_{0,05} - 10$$

$$CN_{UR,0,05} = 0,9 \cdot CN_{0,05} + 10$$

$CN_{LR,0,05}$ Kurvennummer für untere Grenze des Unsicherheitsbereichs für $\lambda = 0,05$

$CN_{UR,0,05}$ Kurvennummer für obere Grenze des Unsicherheitsbereichs für $\lambda = 0,05$

In ZEMOKOST wird der abflusswirksame Niederschlag für jedes Teileinzugsgebiet über den Mittelwert des Abflussbeiwerts der vorhandenen Hydrotupe berechnet. Diesen Abflussbeiwerten liegt eine Vielzahl an Beregnungsversuchen zugrunde (**Box 3.8**). Die Intensitätsabhängigkeit des Abflussbeiwerts ist im Modell automatisch berücksichtigt. Einer Abflussbeiwerteklasse wird jeweils ein Wertebereich eines Abflussbeiwerts zugeordnet, wobei für diesen Abflussbeiwert, der für eine Abflusskonstanz bei 100 mm/h Niederschlag gilt, der untere (u), der mittlere (m) oder der obere (o) Wertebereich festgelegt werden kann. Dieser Wert wird in einen mittleren Abflussbeiwert umgerechnet, der dem tatsächlichen Niederschlag entspricht.

$$a_{ges} = (0,3 \cdot a_{100}^2 + 0,7 \cdot a_{100}) \cdot \left(1 - e^{-0,03 \cdot e^{0,16(3,3 \cdot a_{100})} \cdot i_N^{-0,7 \cdot a_{100} + 1}} + (-0,0035 \cdot a_{100} + 0,0035) \cdot i_N \right)$$

a_{ges} Oberflächenabflussbeiwert der Regenintensität i_N [-]

a_{100} Oberflächenabflussbeiwert in Abflusskonstanz bei einer Regenintensität von 100 mm/h

i_N Regenintensität [mm/h]

3.3.3. Abflusskonzentration und Gerinnerouting

In HEC-HMS wird die SCS-Lag-Formel nach SCS (1972) gewählt (**Box 3.10**). Die Formel berechnet die Verzögerungszeit (Lag-time t_L), die zwischen dem Schwerpunkt des Effektivniederschlags der Dauer (D) und dem Spitzenabfluss liegt. Sie gilt für ländliche Einzugsgebiete mit überwiegendem Oberflächenabfluss.

$$t_L = \frac{3,2808^{0,8}}{1900} \cdot \frac{L^{0,8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}}{J^{0,5}} = \frac{L^{0,8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}}{734,463 \cdot J^{0,5}}$$

Aus der Lag-time kann die Anstiegszeit bis zum Scheitelwert der Ganglinie abgeleitet werden.

$$t_p = \frac{L^{0,8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}}{657,728 \cdot J^{0,5}}$$

t_L SCS lag time [h]

t_p time to peak [h]

D Dauerstufe [h]

L Hydraulische Länge [m]

CN Kurvennummer [-]

S Potentielles Speichervolumen [mm]

J mittlere Neigung des Einzugsgebiets [%]

Die Form der Abflussganglinie beruht auf dem dimensionslosen Unit Hydrograph mit einem Peak Rate Factor (PRF) von 484.

ZEMOKOST (**Box 3.10**) routet Oberflächenabfluss und Interflow mit dem vereinfachten Laufzeitansatz nach Zeller (1981), basierend auf Izzard (1946):

$$t_{Ob} = \frac{527 \cdot c \cdot L^{1/3}}{J^{1/3} \cdot (a \cdot i)^{2/3}}$$

t_{Ob} Anlaufzeit gerinneloser Abfluss [min]

L Weglänge gerinneloser Abfluss [m]

J mittlere Hangneigung [-]

c Rauigkeitskoeffizient nach Izzard (1946) modifiziert nach Zeller (1981) [-]

a Abflussbeiwert [-]

i mittlere Niederschlagsintensität [mm/h]

Die Rauigkeit der Oberfläche wird durch den Rauigkeitskoeffizienten c von Zeller (Tab. 8.8), der effektive Niederschlag durch den ermittelten Abflussbeiwert berücksichtigt.

Tab. 8.8 Rauigkeitskoeffizient (c), verwendet in ZEMOKOST

Bodenbeschaffenheit	Rauigkeitskoeffizient c
Sehr glatt (z. B. Asphaltbelag)	0,00 – 0,02
Ziemlich glatt	0,02 – 0,04
Etwas glatt (z. B. Mähwiese, gepflegt)	0,04 – 0,06
Etwas rau (z. B. Gras, hoch und dicht)	0,06 – 0,08
Ziemlich rau	0,08 – 0,10
Sehr rau	0,10 – 0,12

Der Abfluss im Gerinne wird in ZEMOKOST nach dem konzeptionellen Ansatz von Rickenmann (1996) berechnet.

$$v = \frac{0,37 \cdot g^{0,33} \cdot Q^{0,34} \cdot J^{0,20}}{d_{90}^{0,35}}$$

für $0,8 < J < 63 \%$

$$v = \frac{0,96 \cdot g^{0,36} \cdot Q^{0,29} \cdot J^{0,35}}{d_{90}^{0,23}}$$

für $J < 1 \%$

- v mittlere Abflussgeschwindigkeit [m/s]
- g Erdbeschleunigung [m/s²]
- Q Abfluss [m³/s]
- J Gerinneneigung [–]
- d_{90} Korndurchmesser bei 90 % Siebdurchgang [m]

3.3.4. Typische Berechnungsansätze nach Aufgabenstellung

Typische, einfache Berechnungsansätze zur Ermittlung eines Bemessungsabflusses für kleine Wildbacheinzugsgebiete sind der Hüllkurvenansatz nach Wundt bzw. die Anwendung von Regelganglinien (dimensionsloser unit hydrograph, DUH).

Abflussformel nach Wundt (1953)

Nach Krepis gilt die 90%-Richtkurve der Höchstabflussspenden als obere, technisch noch tragbare Grenze, die vielleicht dem 100-jährlichen Hochwasser entsprechen dürfte (Tab. 8.9). Aufgrund der Steilheit des Geländes und der Vegetation/Landnutzung im oberen Einzugsgebiet kann vorab ein Gebietsfaktor (GF) oder (α) von 10 angenommen werden.

Tab. 8.9 Koeffizienten der 50-, 90- und 100%-Richtkurven (Wundt 1953)

$Q = \alpha \cdot A_E^\beta$	Hüllkurven für Bergland und kontinentale Lage		
	50 %	90 %	100 % (Spitzenwerte)
GF bzw. α	2,050	13,8	500
β	0,714	0,594 (~ 0,6)	0,368

Der Gebietsfaktor kann aus der lokalen bzw. regionalen Abflussstatistik (Kapitel 2.3.4.) abgeschätzt werden.

Verwendung der Regelganglinie (DUH) nach Bergthaler (1986)

Die Hochwasserganglinie nach Bergthaler (1986) weist im absteigenden Ast einen Knick bei der 2-fachen Anstiegsdauer auf, sodass die Abflussfracht der ablaufenden Welle erhöht wird. Mit Kenntnis der Anstiegsdauer (t_{An} bzw. t_p) und der Abflussfracht können die Ordinaten der Ganglinie nach dem in Tab. 8.10 angeführtem Schema ermittelt werden. Mit der Annahme, dass t_p der Niederschlagsdauer (t_N) entspricht, gilt:

$$h_A = a \cdot h_N$$

$$V_D = 1000 \cdot h_A \cdot A_E$$

Tab. 8.10 Regelform nach Bergthaler (1986)

time ratio t/t_p	peak ratio Q/Q_p	$\Delta Q \cdot \Delta t$	$(\Delta Q \cdot \Delta t)/(\sum \Delta Q \Delta t)$	volume ratio V_t/V_D
0	0	0,0000	0,0000	0,000
0,5	0,5	0,1250	0,0781	0,078
1	1	0,3750	0,2344	0,313
1,5	0,7	0,4250	0,2656	0,578
2	0,4	0,2750	0,1719	0,750
2,5	0,3	0,1750	0,1094	0,859
3	0,2	0,1250	0,0781	0,938
3,5	0,1	0,0750	0,0469	0,984
4	0	0,0250	0,0156	1,000
Σ		1,6	1,0000	

Den Formfaktor der Ganglinie kann man analog zum Formfaktor des SCS-DUH als Summe der Ordinaten der Ganglinie mit 1,6 bestimmen (Tab. 8.10).

$$SF = \sum \Delta Q \cdot \Delta t = 1,6$$

Mit dem Ansatz

$$Q_p = \frac{V_D}{1,6 \cdot 60 \cdot t_p} = \frac{V_D}{96 \cdot t_p}$$

ergibt sich für den Scheitelabfluss

$$Q_p = \frac{C_v \cdot V_D}{SF \cdot t_p}$$

- h_N Niederschlagshöhe [mm]
- a Abflussbeiwert [–]
- h_A Abflusshöhe [mm]
- A_E Fläche Einzugsgebiet [km²]
- V_D (Direkt-) Abflussfracht [m³]
- t_p, t_{AN} Anstiegszeit (time to peak) [min]
- SF Formfaktor der Ganglinie [–]
- C_v Umrechnungsfaktor (Minuten in Sekunden) = 1/60
- Q_p Scheitelabfluss [m³/s]

Dimensionslose Einheitsganglinie (DUH) nach Fang et al. (2005)

In Anlehnung an den SCS dimensionslosen Unit Hydrograph (SCS-DUH) kann nach Fang et al. (2005) die Form einer Ganglinie mithilfe einer 2-parametrischen Gamma-Dichtefunktion sehr gut nachgebildet werden. Dafür ist der auch im HEC-HMS implementierte Peak Rate Factor (*PRF*) zu bestimmen.

$$PRF = \frac{C_v}{SF}$$

C_v Umrechnungsfaktor für Einheiten
 PRF Peak rate factor [-]
 SF Shape factor [-]

Mit bekannter Abflussspitze, Anstiegszeit und Direktabflussfracht lässt sich der Formfaktor (SF) und somit der PRF bestimmen.

$$SF = \frac{C_v \cdot h_{N,eff} \cdot A_E}{Q_p \cdot t_p}$$

C_v Umrechnungsfaktor für SI-System (16,667)
 $h_{N,eff}$ Effektivniederschlag [mm], entspricht der Abflusshöhe [mm]
 A_E Fläche Einzugsgebiet [km²]
 Q_p Spitzenabfluss [m³/s]
 t_p Anstiegszeit [min]

Die Umrechnung des PRF des SI-Systems in den des Imperialen Systems erfolgt mit

$$PRF_{imp} = PRF_{SI} \cdot 38,721$$

Für die Gammafunktion gilt:

$$f(t) = \frac{t^\alpha \cdot e^{-\frac{t}{\beta}}}{\beta^{\alpha+1} \Gamma(\alpha+1)} = \frac{\alpha^{\alpha+1}}{(\alpha \cdot \beta) \cdot e^\alpha \cdot \Gamma(\alpha+1)}$$

$$t_p = \alpha \cdot \beta$$

t Zeit mit $0 < t < \infty$
 α Gamma-Parameter ($\alpha > -1$), dimensionsloser Formparameter (shape factor), $\Gamma(\alpha+1) = \alpha!$ für $[0, \infty]$
 β positiver Skalenparameter ($\beta > 0$), Scale factor in der gleichen Einheit wie t , bestimmt t_b

$$\frac{Q_p \cdot t_p}{C_v \cdot A_E} = \phi(\alpha)$$

$$\phi(\alpha) = \frac{1}{SF} = \frac{PRF}{C_v}$$

Eingesetzt in die Formel von Aron & White (1982) lässt sich Parameter (α) der Gamma-Funktion bestimmen.

$$\alpha = 0,045 + 0,5\phi(\alpha) + 5,6\phi(\alpha)^2 + 0,3\phi(\alpha)^3$$

Somit können die Stützstellen des dimensionslosen Unit Hydrograph berechnet werden.

$$\frac{Q(t)}{Q_p} = \left(\frac{t}{t_p} \right)^\alpha \cdot e^{\left(1 - \frac{t}{t_p} \right) \cdot \alpha}$$

Werden die Stützstellen des DUH mit dem bekannten Spitzenabfluss multipliziert, ergibt sich die entsprechende Ganglinie.

$$Q(t) = Q_p \cdot \left(\left(\frac{t}{t_p} \right)^\alpha \cdot e^{\left(1 - \frac{t}{t_p} \right) \cdot \alpha} \right)$$

Dieses Verfahren kann zur Ermittlung einer Ganglinie eingesetzt werden, wenn aus den Berechnungen der verschiedenen Modelle unterschiedliche Hydrographen resultieren, die schlussendlich in eine Bemessungsganglinie überführt werden müssen.

4. Wahl der Modellparameterwerte

4.1. Typen von Modellparametern und ihre Messbarkeit

Dieser Abschnitt des Regelblattes erfordert keine direkte Implementierung im konkreten Projekt.

4.2. Vorgangsweise bei der Parameterwahl

4.2.1. Zusatzinformation: Hard Data und Soft Data

Zur Festlegung der Modellparameter wurden zahlreiche Begehungen durchgeführt, um erstens die Abgrenzung der Teileinzugsgebiete vor Ort zu kontrollieren und zweitens die Gebiete mit ähnlichen hydrologischen Eigenschaften auf Grundlage der Bodenparameter, der Vegetation bzw. Landnutzung und der Oberflächenrauigkeit zu bestimmen (**Box 4.1**).

4.2.2. Städtische vs. ländliche vs. Wildbacheinzugsgebiete

Da in weiterer Folge eine Geschiebetransportberechnung für das Kegelgerinne durchgeführt werden sollte, ist die Berechnung von Abflussganglinien erforderlich (**Box 4.2**).

4.3. A-priori-Parameter

4.3.1. Prozessanalyse und Prozessverständnis – Begehungen

Es wurden zahlreiche Begehungen im Einzugsgebiet (**Box 4.4**) durchgeführt und Ereignisse aufbereitet (siehe Kapitel 2.3.3.).

4.3.2. Prozessanalyse anhand Abflussdaten und Grundwasserganglinien

Es wurden keine Abflussdaten oder Grundwasserganglinien im Gebiet analysiert.

4.3.3. Parameter aus Gebietseigenschaften

Die Modellparameter werden auf Basis von Literaturangaben und Erhebungen vor Ort Flächen mit gleichen Eigenschaften zugeordnet. Die Verschneidung erfolgt im GIS.

Bodenarten

Die im Einzugsgebiet auftretenden Bodenarten wurden entsprechend der SCS-Klassifikation (Tab. 8.11) bei Feldbegehungen angesprochen und verortet (Abb. 8.20).

Tab. 8.11 Bodenarten der SCS-Klassifikation (Hydrologische Bodengruppe)

Bodentyp	Versickerungsvermögen der Böden
A	Hohes Versickerungsvermögen auch bei starker Vorbefeuchtung, z. B. tiefe Sand- und Kiesböden (> 0.76 cm/h)
B	Böden mit mittlerem Versickerungsvermögen, tiefe bis mäßig tiefe Böden mit mäßig feiner bis mäßig grober Textur, z. B. mitteltiefe Sandböden, Löß, (schwach) lehmiger Sand (> 0.38 cm/h und < 0.76 cm/h)
C	Böden mit geringem Versickerungsvermögen, Böden mit feiner bis mäßig feiner Textur oder mit wasserstauer Schicht, z. B. flache Sandböden, sandiger Lehm (> 0.13 cm/h und < 0.38 cm/h)
D	Böden mit sehr geringem Versickerungsvermögen, Tonböden, sehr flache Böden über nahezu undurchlässigem Material, Böden mit dauernd sehr hohem Grundwasserspiegel (< 0.13 cm/h)

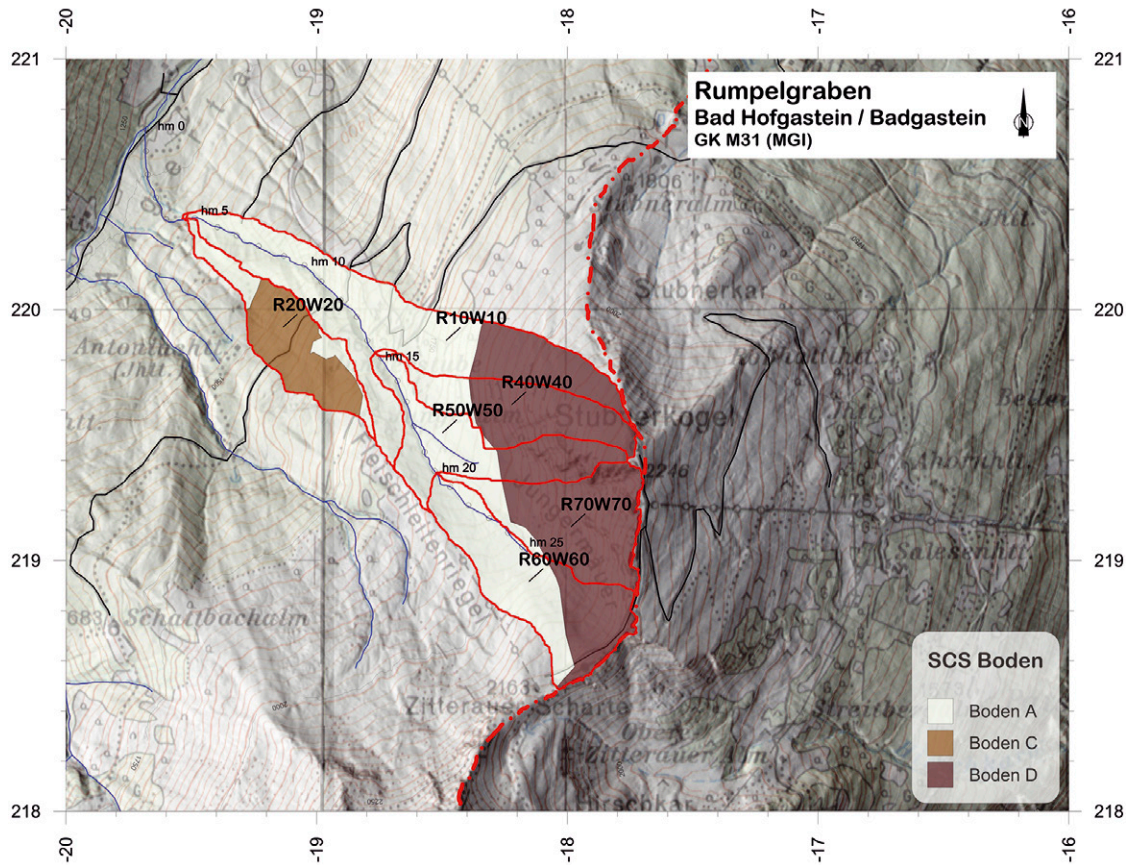


Abb. 8.20 Bodenarten im Einzugsgebiet (SCS-Klassifikation)

Landnutzung

Die Kartierung der Landnutzung erfolgte im Rahmen von Feldbegehungen (**Box 4.4**). Neben der Nutzungsform wurden hydrologisch relevante Gebietseigenschaften (Abb. 8.21) berücksichtigt und für die Modellierung aufbereitet.



Abb. 8.21 Kartierte Feuchtfächen im mittleren Teil des Einzugsgebietes (R20/W20)

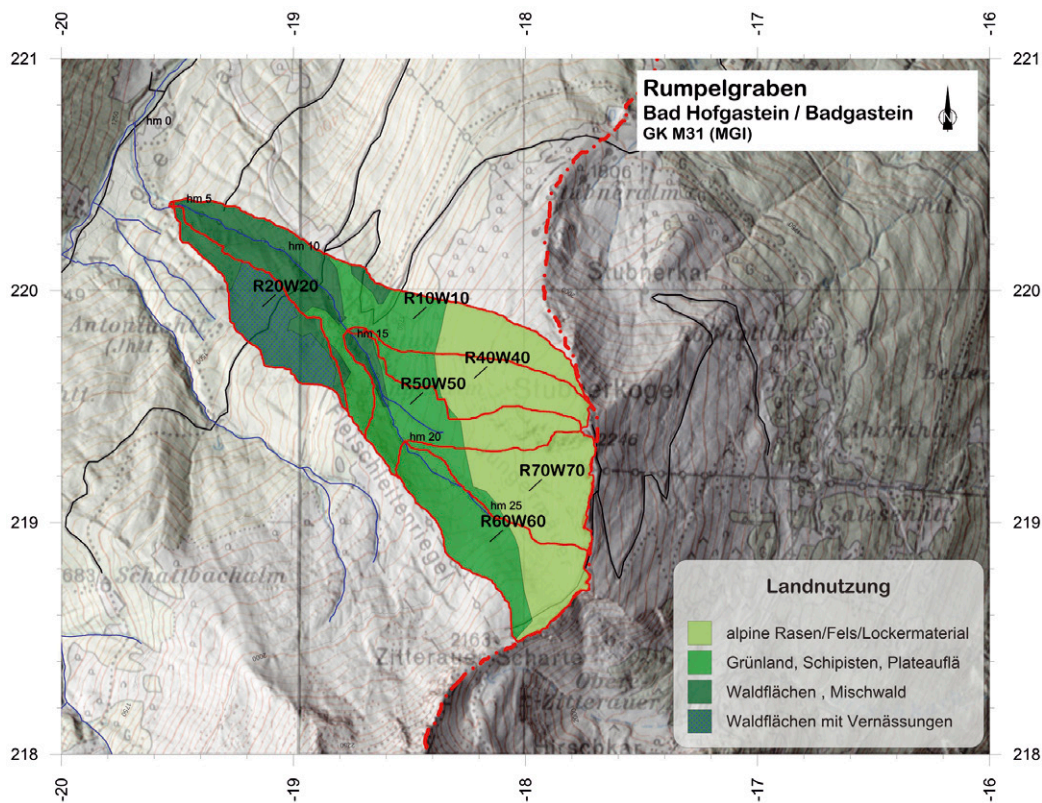


Abb. 8.22 Landnutzungen im Einzugsgebiet (gutachterlich, Basis Orthofoto, hydrologische Studien, Begehungen)

Bestimmung der SCS-Kurvennummern

Zur Berechnung des Rückhaltevermögens des Bodens und des abflusswirksamen Niederschlags wurde das vom Soil Conservation Service (SCS) entwickelte Verfahren (CN-Loss) im Modell HEC-HMS gewählt. Die SCS-CN-Werte (je nach Bodentyp und Landnutzung) wurden aufgrund der Erfahrungen in Wildbacheinzugsgebieten festgelegt (Tab. 8.12, Abb. 8.23).

Tab. 8.12 Bodentyp, Landnutzung und flächengewichtete SCS-Kurvennummer je Teileinzugsgebiet

Teileinzugs- gebietsnummern HEC-HMS	Teileinzugs- gebietsnum- mernZEMOKOST	Boden A	Boden C	Boden D	Alpine Rasen [km ²]	Grünland Skipisten [km ²]	Waldfläche, Mischwald [km ²]	Waldfläche vernässt [km ²]	SCS-CN _{0,20}	SCS-CN _{0,05}
R10W10	5	x				0,145			60	51
R10W10	5	x					0,166		55	46
R10W10	5			x	0,106				85	79
R10W10	5					0,417			64	56
R20W20	6		x				0,122		75	67
R20W20	6	x					0,049		55	46
R20W20	6					0,171			69	61
R40W40	4	x					0,003		55	46
R40W40	4	x				0,036			60	51
R40W40	4			x	0,127				85	79
R40W40	4					0,166			79	72

Teileinzugs- gebietsnummern HEC-HMS	Teileinzugs- gebietsnum- mernZEMOKOST	Boden A	Boden C	Boden D	Alpine Rasen [km ²]	Grünland Skipisten [km ²]	Waldfläche, Mischwald [km ²]	Waldfläche vernässt [km ²]	SCS-CN _{0,20}	SCS-CN _{0,05}
R50W50	3	x					0,024		55	46
R50W50	3	x				0,098			60	51
R50W50	3			x	0,071				85	79
R50W50	3				0,193				69	61
R70W70	2	x				0,028			60	51
R70W70	2			x	0,187				85	79
R70W70	2				0,215				82	75
R60W60	1	x				0,165			60	51
R60W60	1			x	0,091				85	79
R60W60	1				0,256				69	61

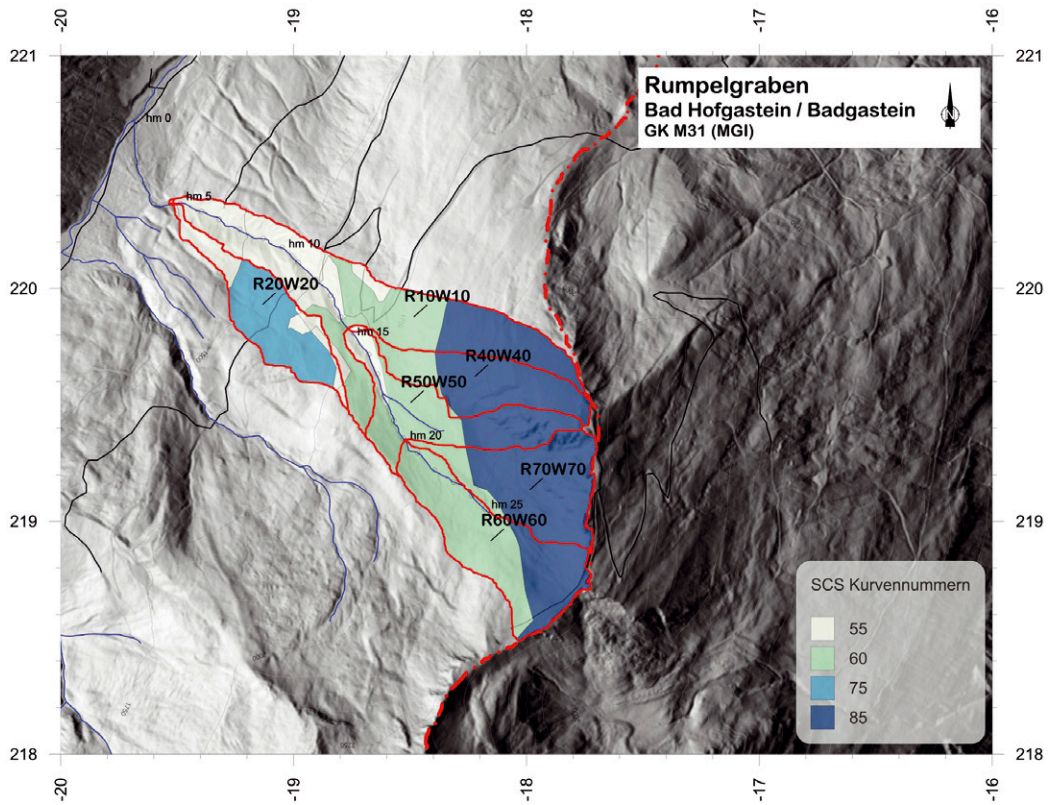


Abb. 8.23 Gliederung der Teileinzugsgebiete und CN_{0,2}-II-Werte

Tab. 8.13 Untere (LR) und obere Grenze (UR) des Unsicherheitsbereichs der flächengewichteten Kurvennummern der Teileinzugsgebiete

Teileinzugsgebiet	CN _{0,05}	CN _{LR;0,05}	CN _{UR;0,05}
R10W10	56	52	60
R20W20	61	57	65
R40W40	72	69	75
R50W50	61	57	65
R60W60	61	57	65
R70W70	75	73	78

Bestimmung der Abflussbeiwertklassen und Oberflächenrauigkeiten (ZEMOKOST)

Oberflächenabflussbeiwerte und Rauigkeiten wurden nach Markart et al. (2004) im Zuge umfangreicher Feldbegehungen entsprechend der Feldanleitung bestimmt (Abb. 8.24, Abb. 8.25). Dabei wurden Gebietseigenschaften zu Boden, Vegetation und Landnutzung kartiert. Maßgebliche Gerinneabschnitte wurden punktuell im Gelände angesprochen und dabei nach Möglichkeit Gerinneprofile, Rauigkeiten sowie aktuelle und potenziell maximale Durchflussraten geschätzt (Tab. 8.14).

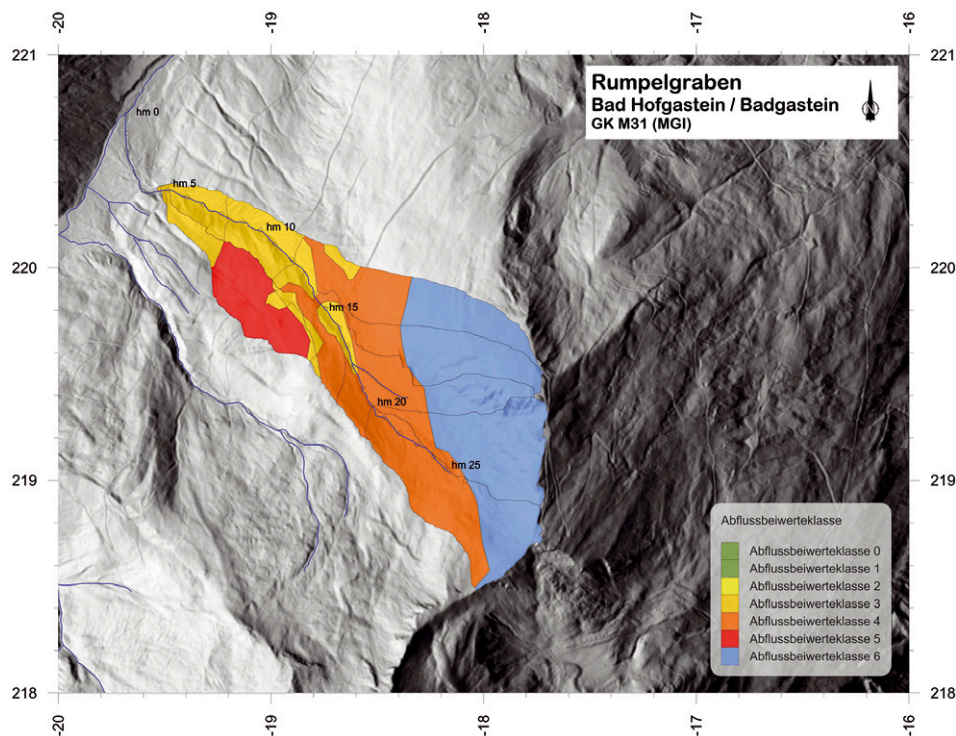


Abb. 8.24 Abflussbeiwertklassen (AKL) für ZEMOKOST

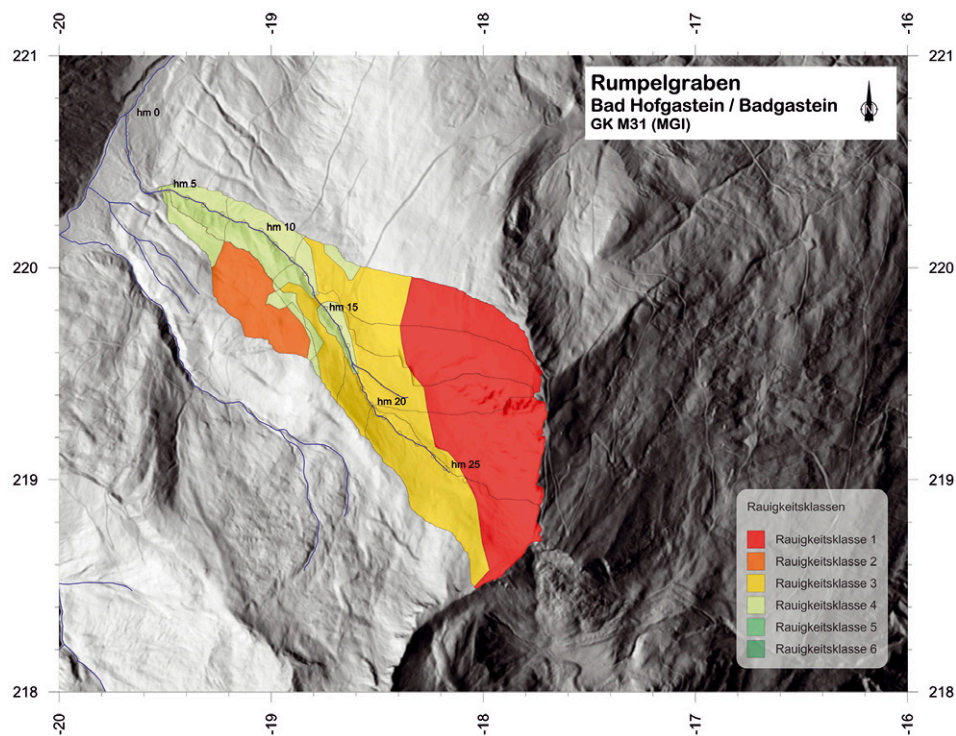


Abb. 8.25 Klassen der Oberflächenrauigkeiten (RKL) für ZEMOKOST

Tab. 8.14 Abflussbeiwertklassen und Oberflächenrauigkeit je Teileinzugsgebiet [km²]

Teileinzugs- gebietsnummern HEC-HMS	Teileinzugs- gebietsnummern ZEMOKOST	AKL 2	AKL 4	AKL 5	AKL 6	RKL 4	RKL 3	RKL 2	RKL 1
R10W10	5		0,145				0,145		
R10W10	5	0,166				0,166			
R10W10	5				0,106				0,106
R20W20	6			0,122					0,122
R20W20	6	0,049				0,049			
R40W40	4				0,127				0,127
R40W40	4		0,036				0,036		
R40W40	4	0,003				0,003			
R50W50	3		0,098				0,098		
R50W50	3				0,071				0,071
R70W70	2				0,187				0,187
R70W70	2		0,028				0,028		
R60W60	1				0,091				0,091
R60W60	1		0,165				0,165		

Abflussbeiwerte – Vergleich mit der Literatur

In der Literatur finden sich zahlreiche Angaben zu Abflussbeiwerten. Beispielhaft sind die Parameter eines zusammengesetzten Abflussbeiwerts nach Garcia (2016) für ländliche Einzugsgebiete angeführt (Tab. 8.16). Dieser Abflussbeiwert (a) setzt sich summarisch aus verschiedenen Teilbeträgen zusammen, die das Relief (a_s), die Infiltration (a_i), die Vegetationsbedeckung (a_v) und die Oberflächenrauigkeit (a_r) beschreiben (Tab. 8.15).

$$a = a_s + a_i + a_v + a_r$$

Setzen sich die Einzugsgebiete aus hydrologisch unterschiedlichen Einheiten zusammen, wird ein flächengewichteter Abflussbeiwert errechnet.

$$\bar{a} = \frac{\sum_{j=1}^n a_j \cdot A_{E,j}}{\sum_{j=1}^n A_{E,j}}$$

Unter Berücksichtigung der Werte der Tab. 8.12 lässt sich ein flächengewichteter Abflussbeiwert von 0,56 für den Rumpelgraben bestimmen (Tab. 8.16).

Tab. 8.15 Zusammengesetzter Abflussbeiwert (Garcia 2016)

	Extreme	High	Normal	Low
Relief a_s	0,28 – 0,35 Steep, rugged terrain with average slopes above 30 %	0,20 – 0,28 Hilly, with average slopes of 10-30%	0,14 – 0,20 Rolling, with average slopes of 5 – 10 %	0,08 – 0,14 Relatively flat land, with average slopes of 0 – 5 %
Soil infiltration a_i	0,12 – 0,16 No effective soil cover; either rock or thin soil mantle of negligible infiltration capacity	0,08 – 0,12 Slow to take up water, clay or shallow loam soils of low infiltration capacity or poorly drained	0,06 – 0,08 Normal; well drained light or medium textured soils, sandy loams	0,04 – 0,06 Deep sand or other soil that takes up water readily; very light, well-drained soils
Vegetal cover a_v	0,12 – 0,16 No effective plant cover, bare or very sparse cover	0,08 – 0,12 Poor to fair; clean cultivation, crops or poor natural cover, less than 20 % of drainage area has good cover	0,06 – 0,08 Fair to good; about 50% of area in good grassland or woodland, not more than 50% of area in cultivated crops	0,04 – 0,06 Good to excellent; about 90% of drainage area in good grassland, woodland, or equivalent cover
Surface Storage a_r	0,10 – 0,12 Negligible; surface depressions few and shallow, drainageways steep and small, no marshes	0,08 – 0,10 Well-defined system of small drainageways, no ponds or marshes	0,06 – 0,08 Normal; considerable surface depression, e.g., storage lakes and ponds and marshes	0,04 – 0,06 Much surface storage, drainage system not sharply defined; large floodplain storage, large number of ponds or marshes

Tab. 8.16 Bestimmung des Abflussbeiwerts (Datengrundlage Tab. 8.12)

Kriterium	Fläche ($A_{E,j}$) (km²)	a_s	a_i	a_v	a_r	$\sum_{j=1}^n a_j \cdot A_{E,j}$ (km ²)
Bodentyp A – SCS	0,71		0,06			0,12
Bodentyp C – SCS	0,12		0,10			
Bodentyp D – SCS	0,58		0,12			
Alpine Rasen	0,58			0,12		0,13
Grünland	0,47			0,10		
Wald, Mischwald	0,36			0,06		
Relief	1,41	0,30				0,43
Surface storage	1,41				0,08	0,11
Summe						0,80
Flächengewichteter Abflussbeiwert	0,80 / 1,41 = 0.56					

Abflusskonzentration und Gerinnerouting

Für die Abflusskonzentration werden Fließlänge und durchschnittliches Gefälle mit ESRI arc hydro tool ermittelt, wobei die vom Programm übergebene horizontale Länge in die schräge Länge umgerechnet wird (Tab. 8.17, Tab. 8.18, Tab. 8.19).

Tab. 8.17 Gefälle und längster Fließweg je Teileinzugsgebiet (horizontale Länge für ZEMOKOST, mittlere schräge Fließlänge für HEC-HMS)

Teileinzugsgebiet	Mittleres Gefälle [%]	Mittleres Gefälle [°]	Horizontale Fließlänge [m]	Schräge Fließlänge [m]
R10W10/ZEMO5	40	21,8	2297,5	2474,5
R20W20/ZEMO6	36	19,8	1433,8	1772,3
R40W40/ZEMO4	42	22,8	1378,8	1855,4
R50W50/ZEMO3	42	22,8	1397,2	1880,1
R60W60/ZEMO1	33	18,3	1213,6	1447,1
R70W70/ZEMO2	36	19,8	1138,0	1406,6

Tab. 8.18 Parameter der Hauptgerinne je Teileinzugsgebiet

Teileinzugsgebiete	Mittleres Gefälle [%]	Mittleres Gefälle [°]	Länge [m]	Schräge Fließlänge [m]	d_{90}
R10W10/ZEMO5	34	18,8	1078	1138,8	0,05
R20W20/ZEMO6	29	16,2	509	530,0	0,05
R40W40/ZEMO4	34	18,8	369	389,8	0,05
R50W50/ZEMO3	27	15,1	598	619,4	0,05
R60W60/ZEMO1	26	14,6	415	428,8	0,05
R70W70/ZEMO2	23	13,0	395	405,4	0,05

Tab. 8.19 Parameter der Fließstrecken für HEC-HMS und ZEMOKOST

Abschnitt [hm – hm]	Schräge Länge [m]	Gefälle [-]	Rauigkeit [$m^{1/3}/s$]	Gerinneform	Gerinnebreite [m]	d_{90} [m]
5 – 15	1138	0,36	20	Rechteck	2	0,05
15 – 20	619	0,30	20	Rechteck	2	0,05

4.4. Parameterkalibrierung am Abfluss

Eine Kalibrierung konnte nicht durchgeführt werden, da keine entsprechenden Daten zur Verfügung stehen.

4.5. Parameter für Gebiete ohne Abflussdaten

Es wurde keine regionale Übertragung der Parameter durchgeführt (siehe Kapitel 4.3.).

5 Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung

5.1. Modellvalidierung an Abflussdaten

Es standen keine Abflussdaten zur Validierung zur Verfügung. Deshalb stützt sich der Modelltest auf die Plausibilisierung.

5.2. Plausibilisierung von Modellen in unbeobachteten Einzugsgebieten

Vom Rumpelgraben existieren weder Aufzeichnungen noch Beobachtungen früherer Ereignisse. Die zahlreich vorhandenen „stummen Zeugen“ deuten auf Murgänge hin, Referenzprofile für reinen Hochwasserabfluss sind im Ablagerungsgebiet nicht vorhanden.

Das dokumentierte Ereignis vom 30. Juli 2016 kann jedoch zur Plausibilisierung verwendet werden, da die Niederschlagsdaten vorliegen und zumindest der Scheitelwert des Abflusses (Leitprozess fluviatiler Feststofftransport) bekannt ist. Die Abflussfracht und die Abflussganglinie sind nicht aufgezeichnet (**Box 5.1**).

Zur Plausibilisierung wird der Ereignisniederschlag der Station Stubnerkogel herangezogen und die Abflüsse am Knoten 2 werden mit HEC-HMS und ZEMOKOST berechnet (**Box 5.2**). Die Lage des Knotens 2 entspricht in etwa der Forststraßenbrücke bei hm 12,35, an der der Scheitelabfluss berechnet wurde. Die Berechnung erfolgt in beiden Modellen mit den Standardparametern (Abb. 8.26, Abb. 8.27, Abb. 8.28).

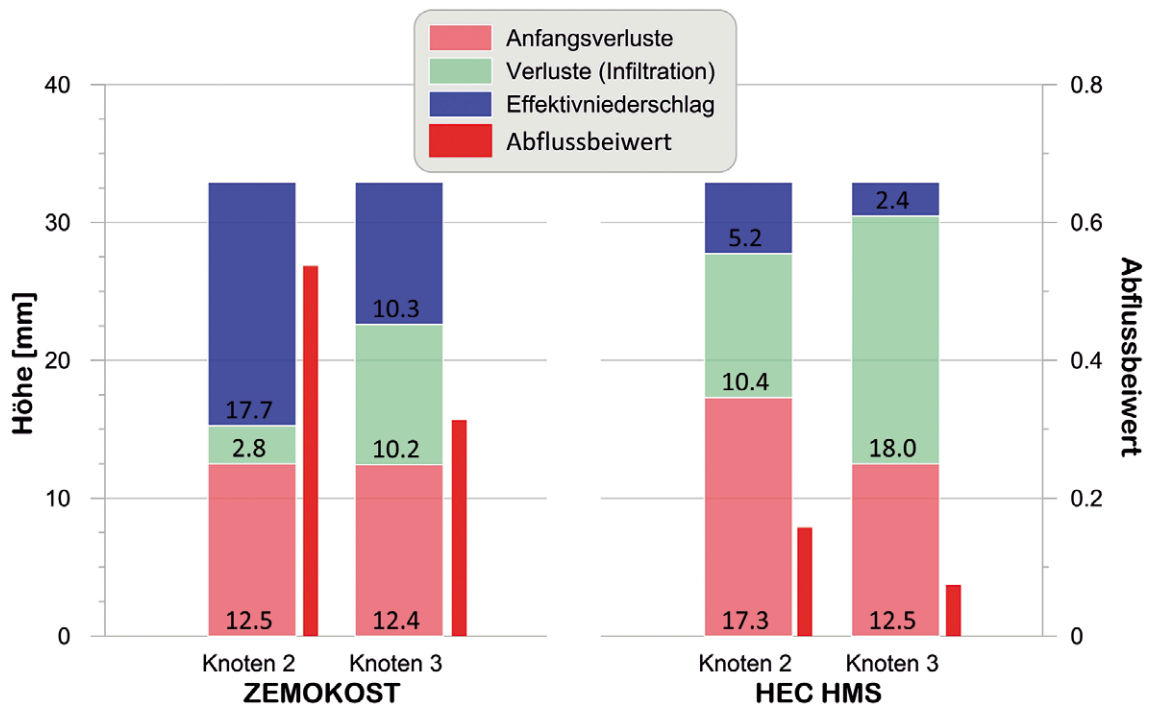


Abb. 8.26 Ereignis vom 30. Juli 2016 am Rumpelgraben: Aufteilung der Niederschlagshöhe (ZEMOKOST und HEC-HMS) in Anfangsverluste, Infiltration und Effektivniederschlag an den Knoten 2 und 3, und den daraus resultierenden Abflussbeiwerten

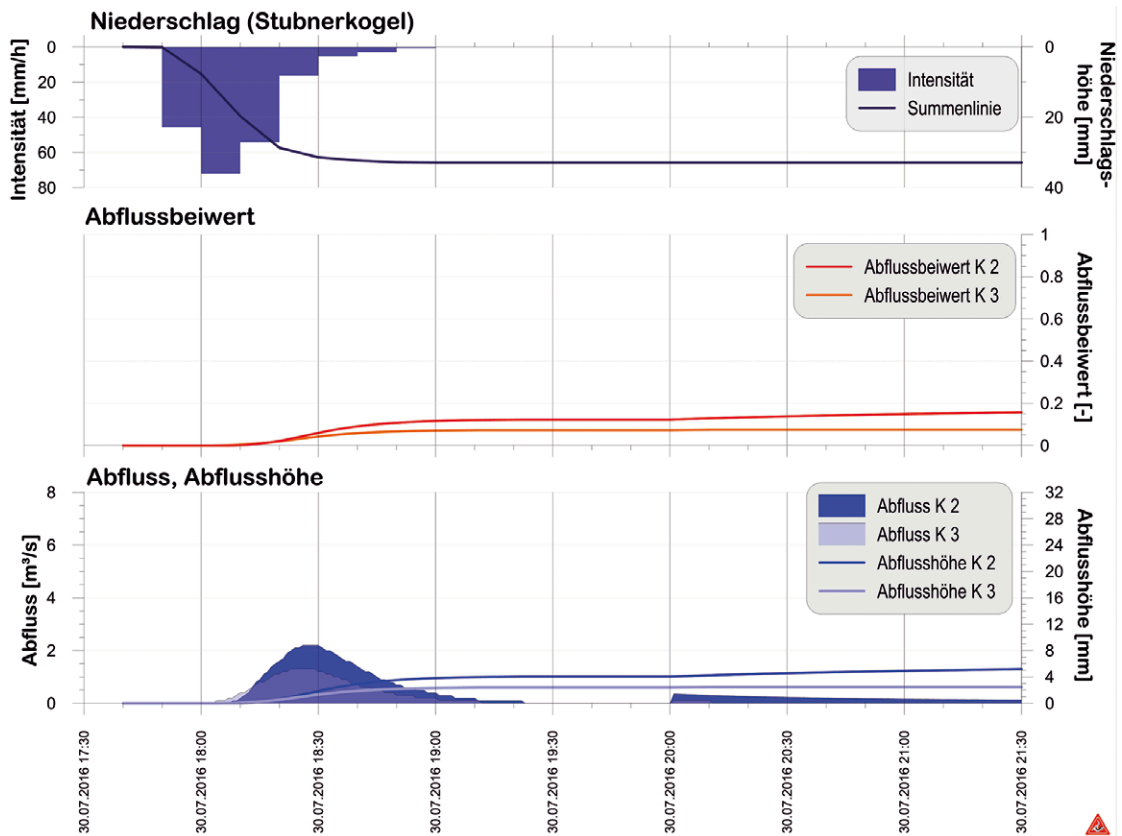


Abb. 8.27 Ereignis vom 30. Juli 2016 am Rumpelgraben, Berechnung mit HEC-HMS

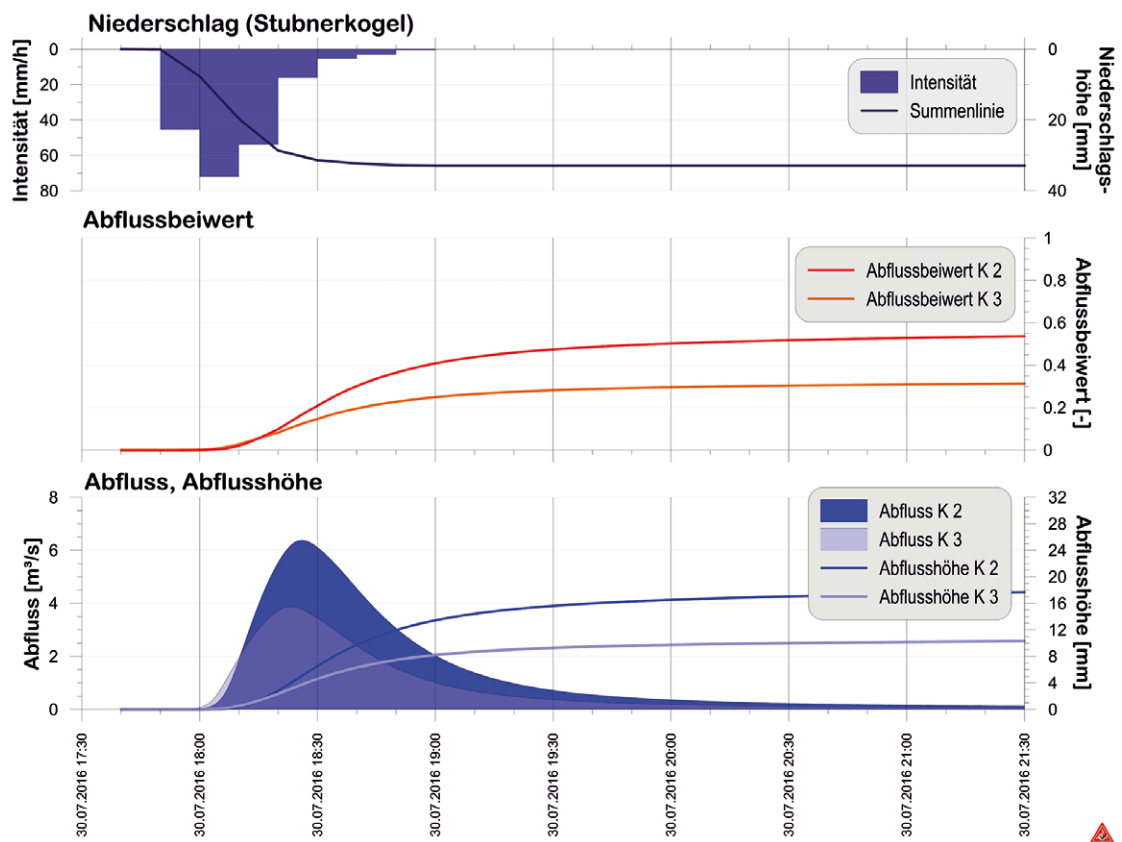


Abb. 8.28 Ereignis vom 30. Juli 2016 am Rumpelgraben, Berechnung mit ZEMOKOST

Am Knoten 2 (hm 15) wird der Scheitelwert mit ZEMOKOST ($6,4 \text{ m}^3/\text{s}$) etwas zu hoch, mit HEC-HMS ($2,2 \text{ m}^3/\text{s}$) im Vergleich zu den aus den Beobachtungen abgeschätzten $5 \text{ m}^3/\text{s}$ bei

hm 12,35 deutlich zu niedrig berechnet (siehe Kapitel 2.3.3). Da nur die Anschlagmarken für den Spitzenabfluss vor Ort erhebbar waren (**Box 5.4**), kann keine Aussage über die Güte der Abschätzung der Abflussfracht oder der Form der Ganglinie getroffen werden. Eine Zuordnung der Abflussspenden (berechnet und dokumentiert) zu den Jährlichkeiten mit dem in Kapitel 2.3.4. angeführten Verfahren zeigt, dass sowohl der Scheitelabfluss des Ereignisses am Lafenbach als auch der Scheitelabfluss des Ereignisses am Rumpelgraben kleiner als der Basis-Bemessungsabfluss waren (Abb. 8.29).

Die Simulationsergebnisse mit dem sehr steilen Anstieg der Ganglinie sowie der Anstiegszeit können als plausibel eingestuft werden. Kontrollrechnungen hinsichtlich Fließgeschwindigkeit liefern ebenfalls realistische Werte. Die Plausibilität für Wildbacheinzugsgebiete muss immer mit den Bemessungsprozessen, in diesem Beispiel Murgang, betrachtet werden. Diesbezüglich ist der berechnete Reinwasserabfluss von untergeordneter Bedeutung, der steile Anstieg der Ganglinie ist jedoch für die Entstehung von Murgängen charakteristisch.

Prinzipiell scheinen beide Modelle mit den Standardparametern für die Anwendung geeignet, die Simulation mit Standardwerten in HEC-HMS dürfte jedoch eher die untere Grenze abbilden. Besonders der in HEC-HMS ermittelte Abflussbeiwert deutet auf zu hoch angesetzte Verluste hin.

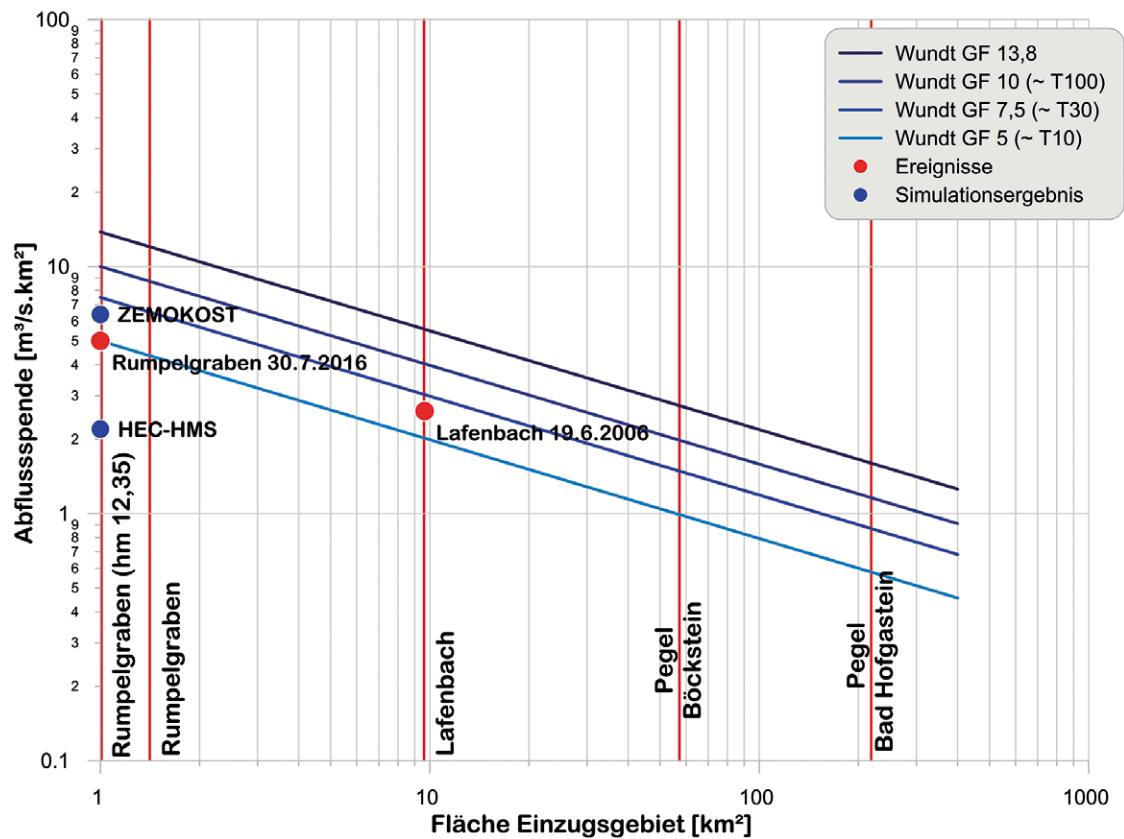


Abb. 8.29 Regionale Statistik der Abflussspenden mit den Abflussspenden der beiden dokumentierten Ereignisse (rote Punkte) sowie den Simulationsergebnissen für das Ereignis 2016 im Rumpelgraben (blaue Punkte)

5.3. Spezielle Aspekte bei Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit (HQ_n)

Die Aufgabenstellung erfordert die Bestimmung des Basis-Bemessungswerts für ein 100-jährliches Ereignis. Es wird angenommen, dass ein etwa 100-jährliches Niederschlagsereignis auch einen Abfluss derselben Jährlichkeit bedingt. Zusätzlich zum Scheitelwert soll auch eine entsprechende Ganglinie erstellt werden, deren Abflussfracht ebenfalls derselben Jährlichkeit entspricht.

Da in kleinen Wildbacheinzugsgebieten die maßgeblichen Ereignisse zumeist aus konvektiven Schauerzellen entstehen, wird eine Absenkung der Null-Grad-Grenze, wie sie bei Frontdurchgängen üblich ist, nicht angenommen. Das bedeutet, dass das gesamte Einzugsgebiet potenziell überregnet werden kann. Welchen Einfluss Hagel auf das Abflussgeschehen hat, ist nicht erforscht.

Die Niederschlagsdauer sollte zumindest die Anstiegszeit der Ganglinie für das gesamte Einzugsgebiet und die Abstraktionszeit umfassen. Mit den Dauerstufen von 20 bis 60 Minuten ist diese Zeitspanne abgedeckt (Tab. 8.5). Längere Dauerstufen sind nicht erforderlich, da keine Hochwasserrückhaltmaßnahmen geplant sind (**Box 5.5**). Alle für die Modelle erforderlichen Parameter wurden a priori auf Basis von vorliegenden Datensätzen und Prozessüberlegungen festgelegt (**Box 5.7**). Eine Kalibrierung auf Basis einer Pegelstatistik erfolgt nicht, die Simulationsergebnisse werden jedoch mit den Ergebnissen der regionalen Abflussstatistik, die hydrologischen Längenschnitten entnommen ist, verglichen (**Box 5.8**).

Da keine Abflussdaten für das Einzugsgebiet vorliegen, werden mehrere Modelle für die Niederschlag-Abfluss-Simulation verwendet, die Modellparameter variiert, die Unsicherheiten abgeschätzt und schlussendlich die Ergebnisse plausibilisiert (**Box 5.10**) und es wird eine regionale Einordnung vorgenommen (**Box 5.11**).

5.4. Modellanwendung auf Aufgabenstellung

Die Modelle werden primär mit den Parameterwerten für den „Standardfall“ angewendet. Dies bedeutet für HEC-HMS „übliche“ Abflussbedingungen (Antecedent runoff conditions, ARC II), für ZEMOKOST den Systemzustandindex 0 und den mittleren Klassenbereich für den Abfluss (**Box 5.12**).

Zur Abschätzung der Auswirkung hydrologisch positiver bzw. negativer Systemzustände werden die Berechnungen auch mit Parametern unterschiedlicher Systemzustände durchgeführt:

- im Fall von HEC-HMS mit ARC II und mit dem Unsicherheitsbereich gemäß ASCE (lower and upper range of CN values) von ungefähr 10 Prozent,
- im Fall von ZEMOKOST mit Systemzustand -6, 0, +6 sowie mit den Klassenbereichen (KB) von unterer (u), mittlerer (m) und oberer (o) Grenze.

Abflussvolumen – Modell HEC-HMS

Tab. 8.20 Potenzielles Speichervermögen und Anfangsverluste der Teileinzugsgebiete nach SCS (ARC II, $\lambda = 0,05$)

Teileinzugsgebiet	Fläche [km ²]	CN _{0,05} II [-]	S _{0,05} [mm]	A _v [mm]
R10W10	0,417	56	199,6	10,0
R20W20	0,171	61	162,4	8,1
R40W40	0,166	72	98,8	4,9
R50W50	0,193	61	162,4	8,1
R60W60	0,256	61	162,4	8,1
R70W70	0,215	75	84,7	4,2

Tab. 8.21 Potenzielles Speichervermögen und Anfangsverluste der Teileinzugsgebiete nach SCS für die untere Grenze des Unsicherheitsbereichs ($CN_{LR;0,05}$, $\lambda = 0,05$)

Teileinzugsgebiet	Fläche [km ²]	CN _{0,05} [-]	S _{0,05} [mm]	A _v [mm]
R10W10	0,417	52	234,5	11,7
R20W20	0,171	57	191,6	9,6
R40W40	0,166	69	114,1	5,7
R50W50	0,193	57	191,6	9,6
R60W60	0,256	57	191,6	9,6
R70W70	0,215	73	93,9	4,7

Tab. 8.22 Potenzielles Speichervermögen und Anfangsverluste der Teileinzugsgebiete nach SCS für die obere Grenze des Unsicherheitsbereichs ($CN_{UR;0,05}$, $\lambda = 0,05$)

Teileinzugsgebiet	Fläche [km ²]	CN _{0,05} [-]	S _{0,05} [mm]	A _v [mm]
R10W10	0,417	60	169,3	8,5
R20W20	0,171	65	136,8	6,8
R40W40	0,166	75	84,7	4,2
R50W50	0,193	65	136,8	6,8
R60W60	0,256	65	136,8	6,8
R70W70	0,215	78	71,6	3,6

Tab. 8.23 Niederschlagsverluste der Teileinzugsgebiete für die gewählten Dauerstufen (ARC II, $\lambda = 0,05$)

Teileinzugsgebiet	h _{N,v} 0,33 h [mm]	h _{N,v} 0,5 h [mm]	h _{N,v} 1 h [mm]
R10W10	28,8	33,8	40,8
R20W20	29,2	33,7	40,1
R40W40	27,8	31,2	35,9
R50W50	29,2	33,7	40,1
R60W60	29,2	33,7	40,1
R70W70	26,9	30,0	34,1

Tab. 8.24 Abflusshöhe der Teileinzugsgebiete für die gewählten Dauerstufen (ARC II, $\lambda = 0,05$)

Teileinzugsgebiet	h _A 0,33 h [mm]	h _A 0,5 h [mm]	h _A 1 h [mm]
R10W10	4,9	6,9	10,5
R20W20	6,4	8,8	13,1
R40W40	10,9	14,4	20,5
R50W50	6,4	8,8	13,1
R60W60	6,4	8,8	13,1
R70W70	12,5	16,4	23,0

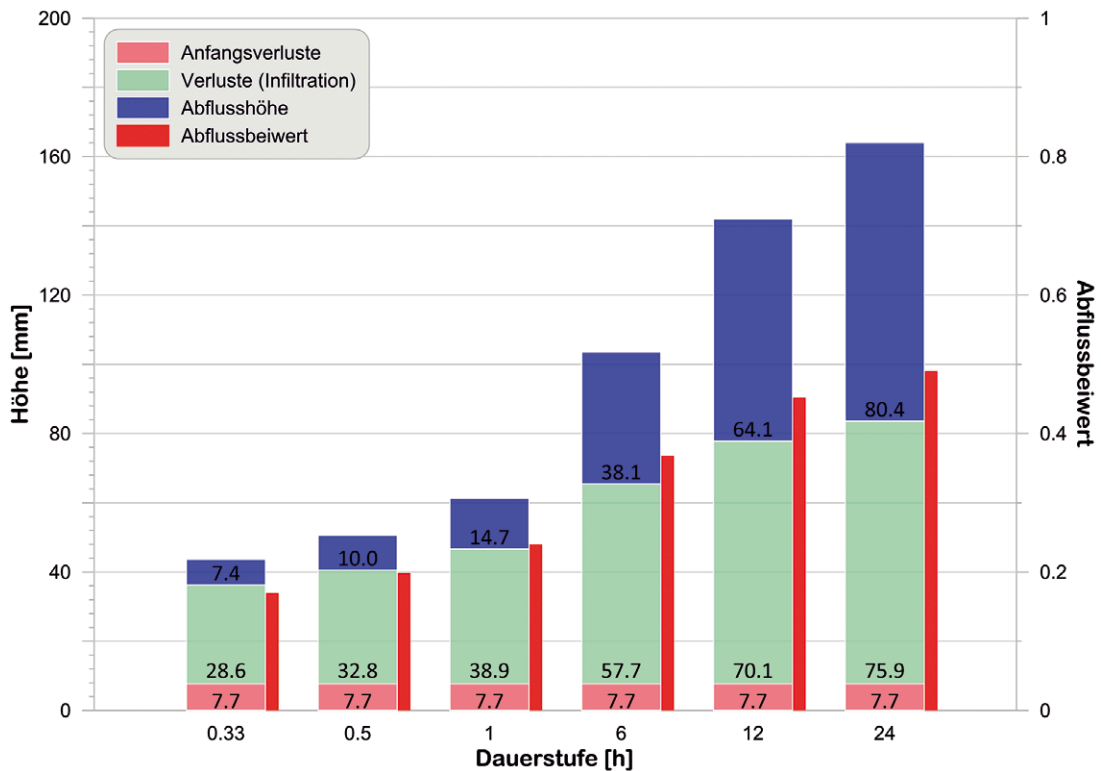


Abb. 8.30 Flächengewichtete Aufteilung der Niederschlagshöhe (Jährlichkeit = 100 Jahre, siehe Tab. 8.4) verschiedener Dauerstufen (HEC-HMS, ARC II, $\lambda = 0,05$) in Anfangsverluste, Infiltration und Abflusshöhe am Knoten 1 (Gebietsauslass, hm 5), und den daraus resultierenden Abflussbeiwerten

Abflussvolumen – Modell ZEMOKOST

Tab. 8.25 Niederschlagsverluste der Teileinzugsgebiete für die gewählten Dauerstufen (SZI ± 0 , KB „m“) ohne Berücksichtigung von Anfangsverlusten

Teileinzugsgebiet	Fläche [km ²]	$h_{N,v}$ 0.33 h [mm]	$h_{N,v}$ 0.5 h [mm]	$h_{N,v}$ 1 h [mm]
R10 ZEMO5	0,417	22,9	18,1	11,4
R20 ZEMO6	0,171	18,8	14,8	9,3
R40 ZEMO4	0,166	16,3	12,8	7,9
R50 ZEMO3	0,193	16,8	13,2	8,2
R60 ZEMO1	0,256	17,2	13,6	8,4
R70 ZEMO2	0,215	14,1	10,9	6,7

Tab. 8.26 Abflusshöhe der Teileinzugsgebiete für die gewählten Dauerstufen (SZI ± 0 , KB „m“) ohne Berücksichtigung von Anfangsverlusten

Teileinzugsgebiet	Fläche [km ²]	h_A 0.33 h [mm]	h_A 0.5 h [mm]	h_A 1 h [mm]
R10 ZEMO5	0,417	20,9	32,5	32,5
R20 ZEMO6	0,171	25,0	35,8	35,8
R40 ZEMO4	0,166	27,4	37,8	37,8
R50 ZEMO3	0,193	27,0	37,4	37,4
R60 ZEMO1	0,256	26,5	37,0	37,0
R70 ZEMO2	0,215	29,7	39,7	39,7

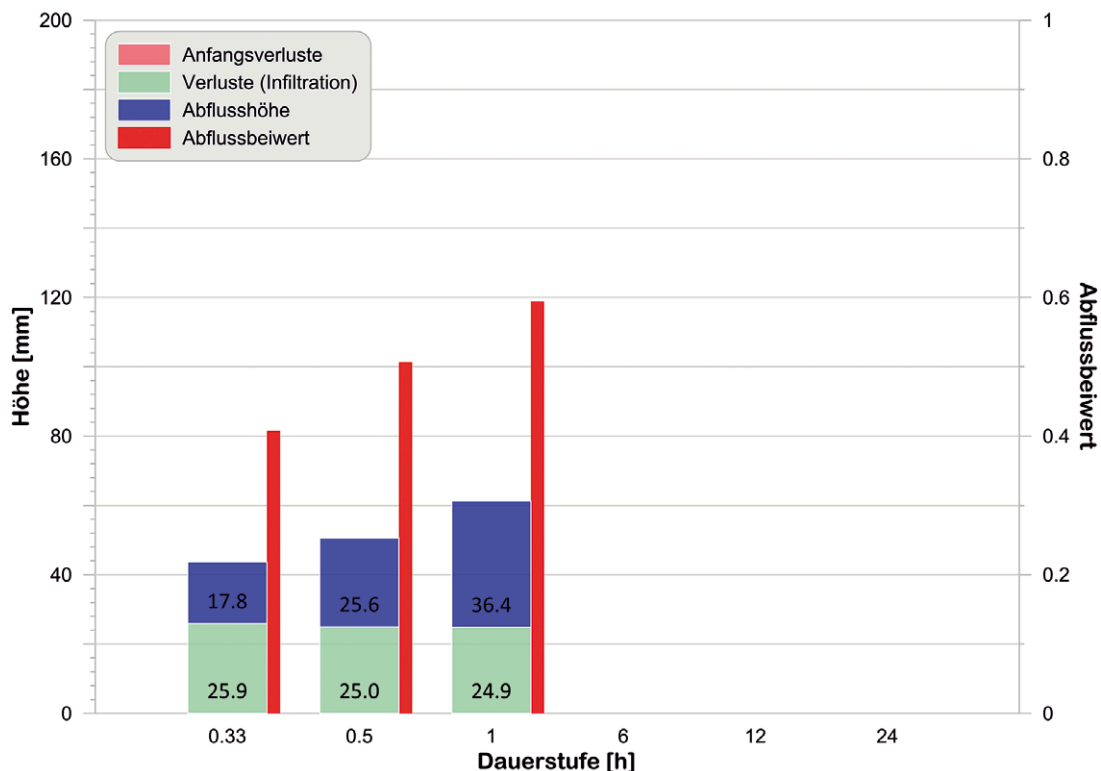


Abb. 8.31 Flächengewichtete Abflussanteile und Abflussbeiwerte für den Niederschlag (Jährlichkeit = 100 Jahre, siehe Tab. 8.4) verschiedener Dauerstufen (ZEMOKOST) am Knoten 1 (Gebietsauslass, hm 5); berechnet für die 10-fache Dauer des Niederschlags

Abflusskonzentration – Modelle HEC-HMS und ZEMOKOST

Tab. 8.27 HEC-HMS: Verzögerungs-, Konzentrations- und Anstiegszeit je Teileinzugsgebiet für den Standardfall und den unteren und oberen Unsicherheitsbereich

Teileinzugsgebiet	t_L [min]			t_c [min]			t_p [min]		
	LR $\lambda=0,05$	ARC II $\lambda=0,05$	UR $\lambda=0,05$	LR $\lambda=0,05$	ARC II $\lambda=0,05$	UR $\lambda=0,05$	LR $\lambda=0,05$	ARC II $\lambda=0,05$	UR $\lambda=0,05$
R10W10/ZEMO5	30	27	24	50	45	40	34	30	27
R20W20/ZEMO6	19	17	15	32	28	25	21	19	17
R40W40/ZEMO4	13	12	11	22	20	18	15	13	12
R50W50/ZEMO3	18	16	14	30	27	23	20	18	15
R60W60/ZEMO1	17	15	14	28	25	23	19	17	15
R70W70/ZEMO2	9	9	8	15	15	13	10	10	9

Die Scheitelabflüsse, berechnet mit den Standardwerten und dem 100-jährlichen Niederschlag, zeigen eine große Schwankungsbreite (Abb. 8.32). Die Simulationsergebnisse von HEC-HMS liegen zwischen 8 und 11 m³/s, von ZEMOKOST hingegen zwischen 14 und 19 m³/s. ZEMOKOST liefert somit eindeutig höhere Spitzenabflüsse als HEC-HMS. Die höchsten Scheitelwerte werden in HEC-HMS mit einer Dauerstufe des Niederschlags von rund 20 Minuten erzielt, in ZEMOKOST mit einer Dauerstufe von rund 30 Minuten. Diese werden dabei rund 35 Minuten nach Niederschlagsbeginn erreicht.

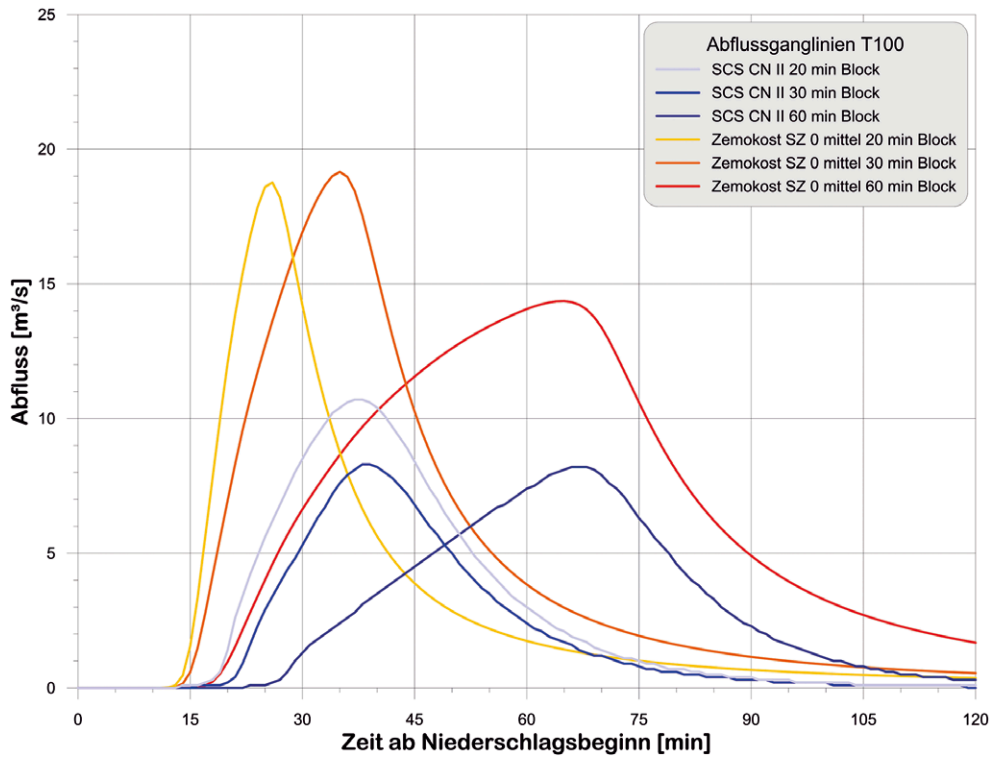


Abb. 8.32 Gegenüberstellung der Ganglinien für mittlere hydrologische Ausgangsbedingungen und unterschiedlicher Dauerstufe, berechnet mit HEC-HMS (Blautöne) und ZEMOKOST (Rottöne)

Die errechneten Abflussfrachten mit den Standardwerten für unterschiedliche Dauerstufen schwanken bei HEC-HMS zwischen 14000 und 21000 m³, bei ZEMOKOST hingegen im Bereich von 25000 und 45000 m³ (Abb. 8.33). Erhöht man in ZEMOKOST die Dauerstufe um 10 Minuten, so erhält man eine rund 10000 m³ größere Abflussfracht. Die Frachten für die Dauerstufen 20 und 60 Minuten sind in HEC-HMS etwa gleich hoch, die Dauerstufe 30 Minuten weist eine wesentlich geringere Fracht auf.

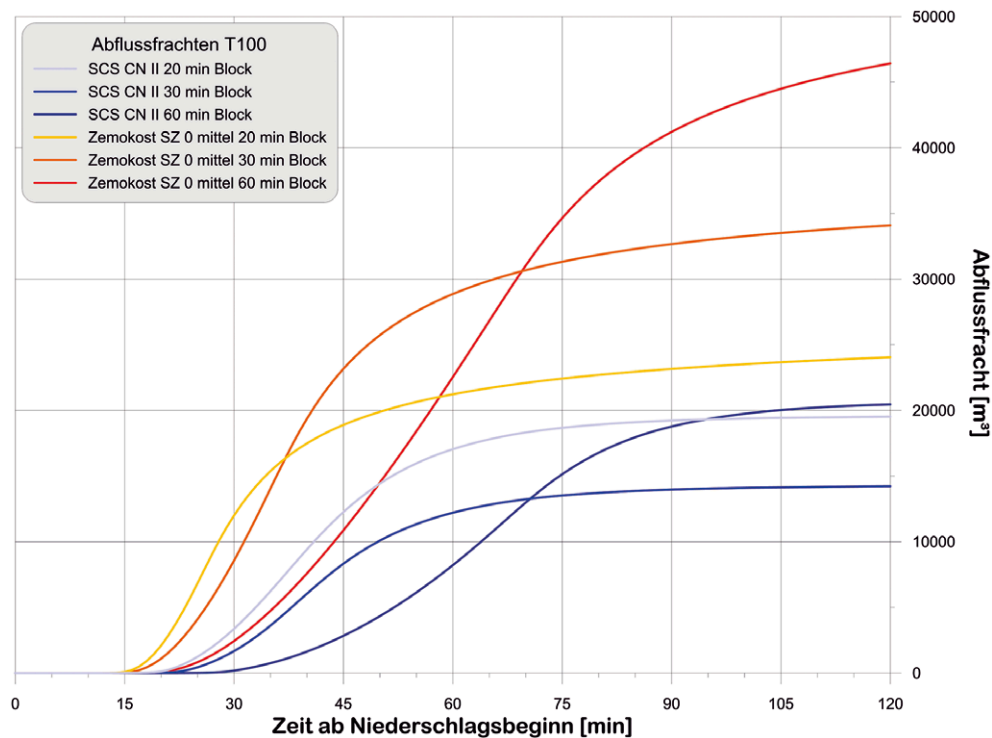


Abb. 8.33 Gegenüberstellung der Frachten für mittlere hydrologische Ausgangsbedingungen und unterschiedlicher Dauerstufe, berechnet mit HEC-HMS (Blautöne) und ZEMOKOST (Rottöne)

Wird der vorgeschlagene Unsicherheitsbereich berücksichtigt, so liegen die Scheitelabflüsse für die Dauerstufe 20 Minuten zwischen 9,3 und 13,4 m³/s, für die Dauerstufe 30 Minuten zwischen 7,0 und 10,4 m³/s und für die Dauerstufe 60 Minuten zwischen 7,2 und 9,8 m³/s. Der Unsicherheitsbereich nimmt also mit zunehmender Dauerstufe geringfügig ab (Abb. 8.34).

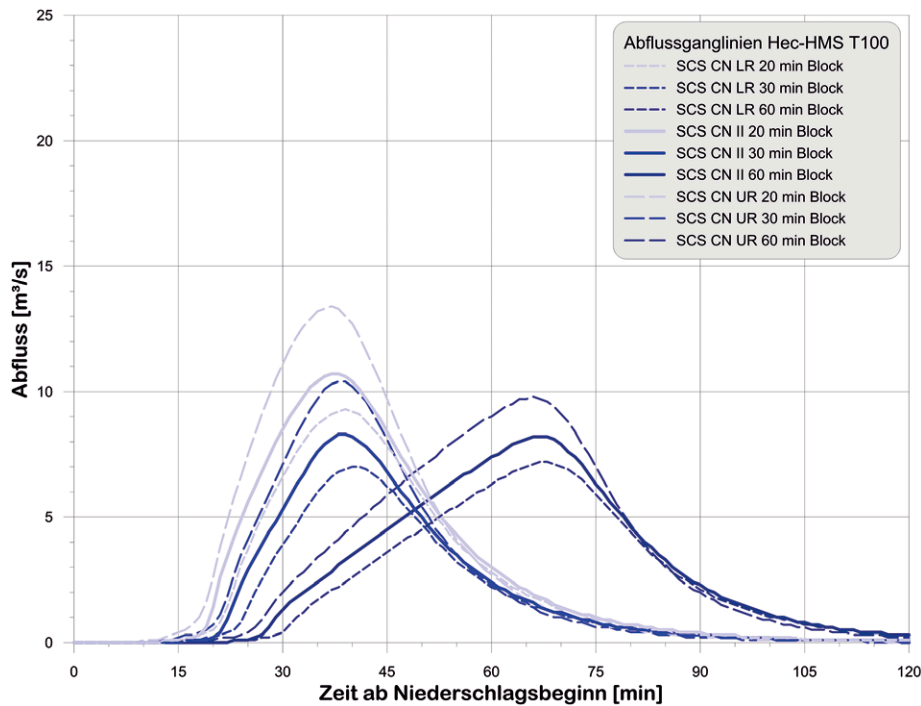


Abb. 8.34 Gegenüberstellung der Ganglinien des verwendeten Modells HEC-HMS für verschiedene Dauerstufen für den Standardfall und den vorgeschlagenen Unsicherheitsbereichen

Die Abflussfrachten (Abb. 8.35) zwischen unterer und oberer Grenze des Unsicherheitsbereichs schwanken für die Dauerstufe 20 Minuten von 17000 m³ (LR) bis 23000 m³ (UR), für die Dauerstufe 30 Minuten von 12000 m³ (LR) bis 17000 m³ (UR) und für die Dauerstufe von 60 Minuten von 18000 m³ (LR) bis 24000 m³ (UR).

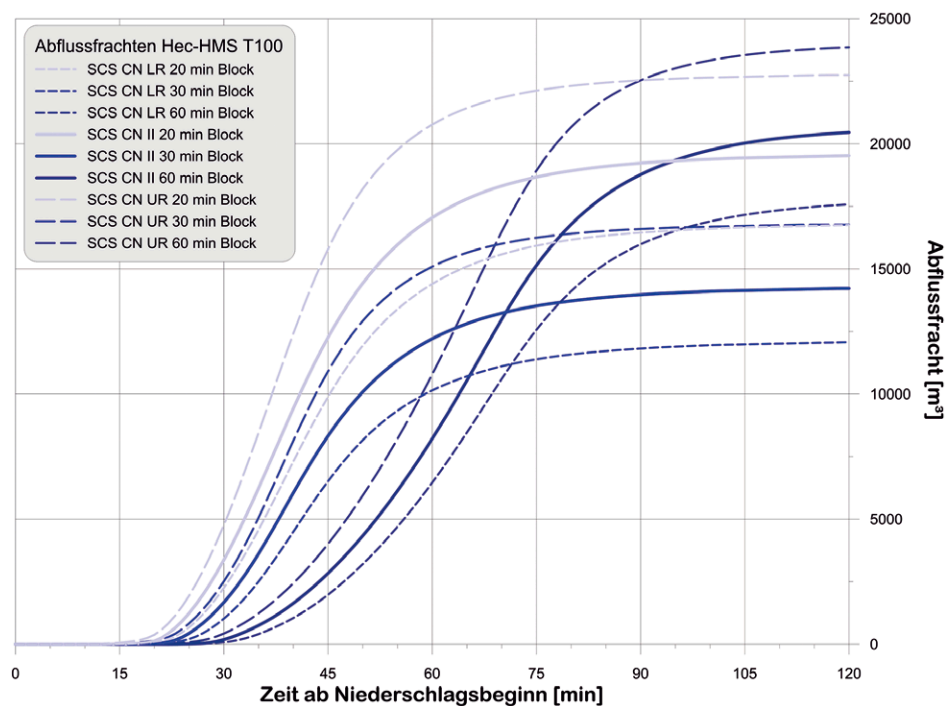


Abb. 8.35 Gegenüberstellung der Abflussfrachten des verwendeten Modells HEC-HMS für verschiedene Dauerstufen für den Standardfall und die vorgeschlagenen Unsicherheitsbereiche

Betrachtet man in ZEMOKOST nur die maßgebliche Dauerstufe von 30 Minuten (Abb. 8.36), so ist der Schwankungsbereich der Scheitelabflüsse der Klassenbereiche (o, u) für alle Systemzustände kleiner als $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieser Schwankungsbereich erhöht sich, wenn man den SZI verringert, bzw. verringert er sich, wenn man den SZI erhöht.

Mit einem SZI von +6 errechnen sich Scheitelabflüsse von im Mittel $15,2 \text{ m}^3/\text{s}$, mit einem SZI von -6 ergeben sich im Mittel $22 \text{ m}^3/\text{s}$. Vergleicht man die Ergebnisse für den mittleren Klassenbereich für den SZI +6 bzw. -6 , variieren die Abflüsse zwischen $18,3$ und $19,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

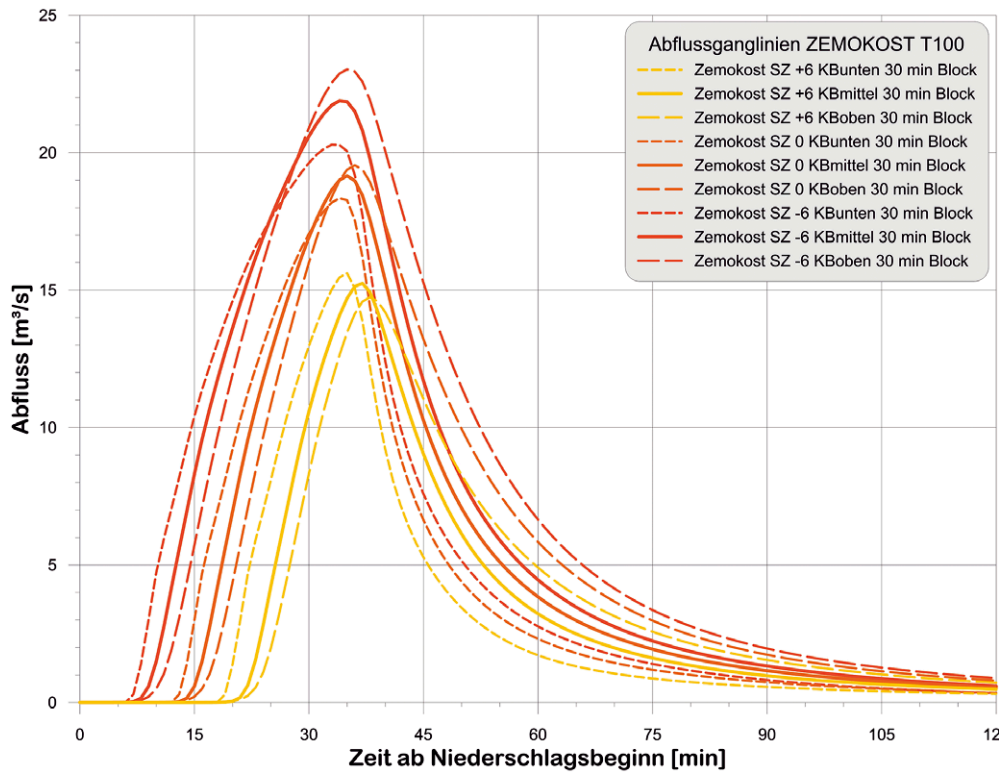


Abb. 8.36 Gegenüberstellung der Ganglinien des verwendeten Modells ZEMOKOST bei einer Dauerstufe von 30 Minuten für unterschiedliche hydrologische Ausgangsbedingungen

Die Abflussfrachten (Abb. 8.37) schwanken im SZI 0 (blaue Farbtöne) unter Anwendung der Klassenbereiche (o, m, u) nach 5 Stunden zwischen 30700 und 41600 m^3 . Für den SZI +6 kann der Schwankungsbereich für die Klassen (o, m, u) zwischen 21500 und 29600 , und für den SZI -6 für die Klassen (o, m, u) zwischen 39700 und 53500 angegeben werden.

Berücksichtigt man nur den Klassenbereich „m“ und variiert den SZI zwischen +6 und -6 , schwanken die Frachten nach 5 Stunden zwischen 25500 und 46600 m^3 .

Durch die verschiedenen Varianten der Modelle ergeben sich (auch für ähnliche Scheitelwerte) große Schwankungen in der Abflussfracht (**Box 6.1**, Abb. 8.38). Eindeutig liegen die Berechnungsergebnisse, sowohl die Scheitelwerte als auch die Frachten betreffend, von HEC-HMS unter denen von ZEMOKOST.

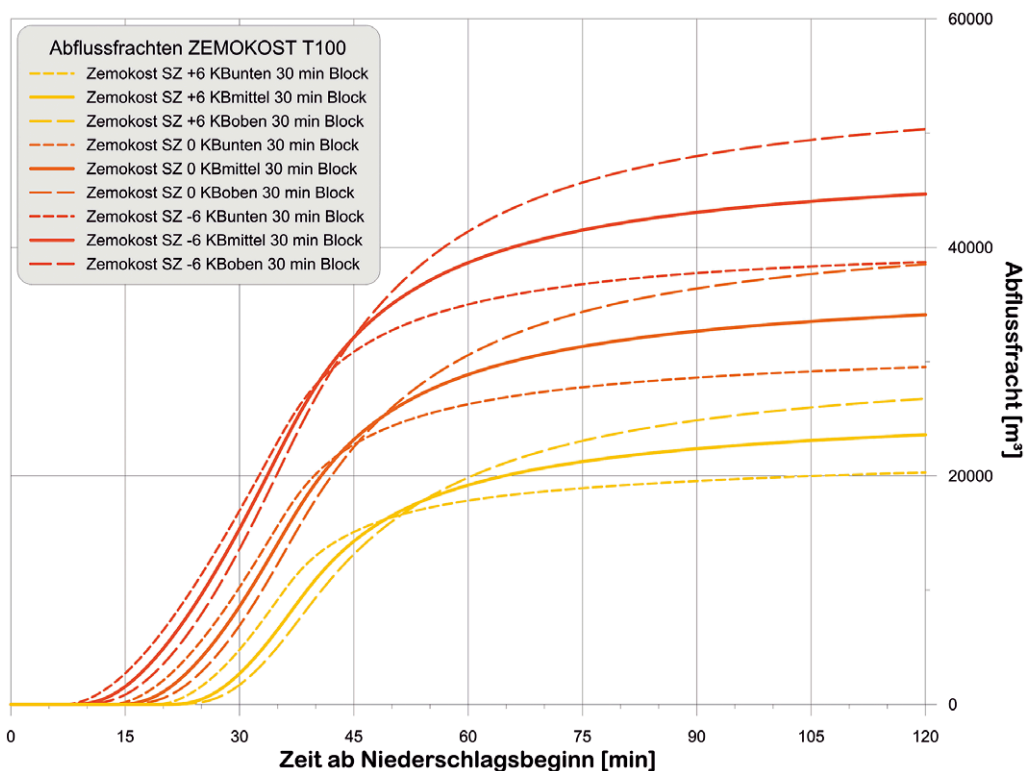


Abb. 8.37 Gegenüberstellung der Abflussfrachten des verwendeten Modells ZEMOKOST bei einer Dauerstufe von 30 Minuten für unterschiedliche hydrologische Ausgangsbedingungen

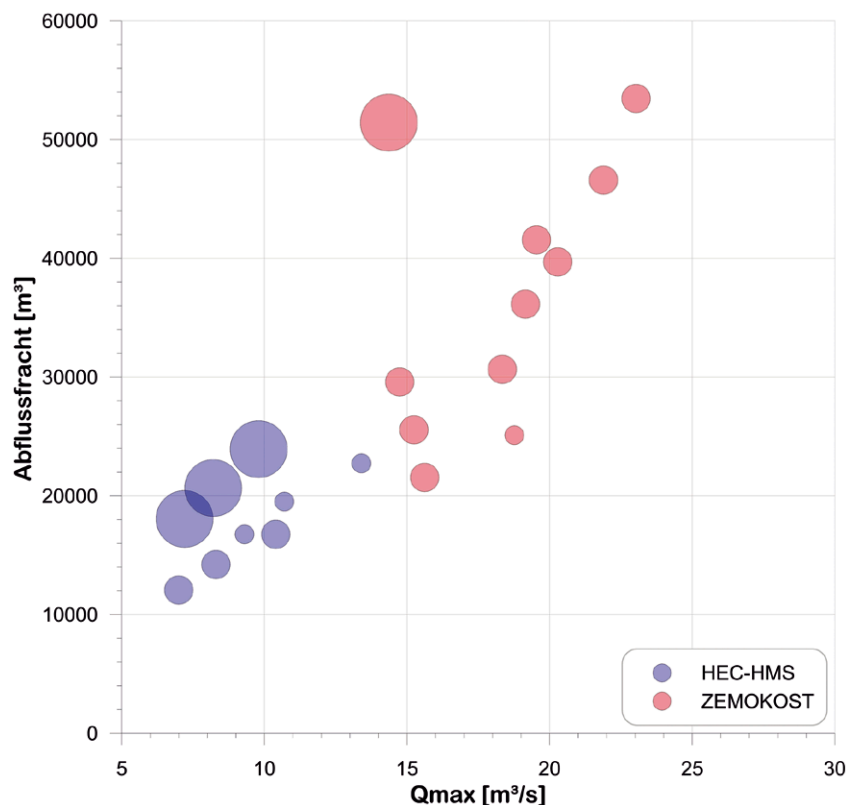


Abb. 8.38 Gegenüberstellung der Scheitelabflüsse und Frachten der unterschiedlichen Szenarien bei unterschiedlichen Dauerstufen (kleiner Radius 20 Minuten, mittlerer Radius 30 Minuten, großer Radius 60 Minuten), Jährlichkeit des Niederschlags: 100 Jahre

Abflussformel nach Wundt (1953) unter Berücksichtigung der regionalen Abflussstatistik

Unter Zugrundelegung des in Kapitel 3.3.4. geschätzten Gebietsfaktors kann der $HQ_{90\%}$ -Wert ermittelt werden.

$$HQ_{90\%} = 10 \cdot A_E^{0,6} \approx 12,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Hq_{90\%} = \alpha \cdot A_E^{-0,4} \approx 8,7 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$$

Regelganglinie (DUH) nach Bergthaler (1986)

Die geschätzte Anstiegszeit beträgt zwischen 20 und 30 Minuten, der Abflussbeiwert wird für das Bemessungsereignis mit 0,56 (Kapitel 4.3.3.) angenommen. Die Ermittlung der hydrologischen Kennwerte (Tab. 8.28, Abb. 8.39) beruht auf dem in Kapitel 3.3.4. angeführten Verfahren.

Tab. 8.28 Kennzahlen für Regelganglinien

Dauer Niederschlag [min]	Summe Niederschlag [mm]	Niederschlag effektiv [mm]	Fracht Direktabfluss [m³]	Spitzenabfluss [m³/s]	Abflussspende [m³/s.km²]
20	43,7	24,5	32100	16,7	11,8
30	50,6	28,3	37100	12,9	9,2

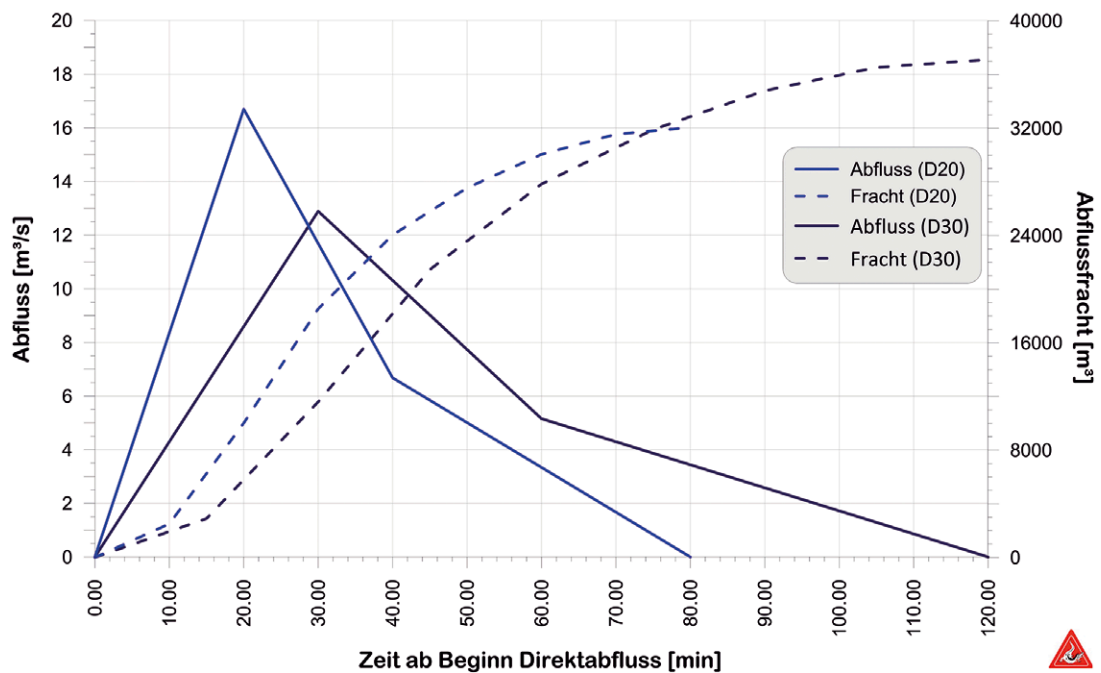


Abb. 8.39 Plausibilisierung mit der Regelganglinie (DUH) nach Bergthaler für Dauerstufen von 20 und 30 Minuten

6. Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse

6.1. Beurteilung der Unsicherheit der Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse zeigen die typische große Streuung der Abflüsse und Frachten (Tab. 8.29).

Tab. 8.29 Abflussscheitel, Frachten, Abflussspenden, Abstraktions- und Anstiegszeiten der berechneten Szenarien

Szenario	Dauerstufe D [min]	Abflussspitze Q_p [m ³ /s]	Abflussfracht (10D) [m ³]	Abflussspende H_q [m ³ /s.km ²]	Abstraktionszeit [min]	Anstiegszeit t_p [min]	Gewichtung g [-]
SCS CN05 LR 20 min Block	20	9,3	16758	6,6	13	26	1
SCS CN0,05 ARC II 20 min Block	20	10,7	19530	7,5	14	23	3
SCS CN0,05 UR 20 min Block	20	13,4	22746	9,4	10	27	1
SCS CN0,05 LR 30 min Block	30	7,0	12078	4,9	16	24	1
SCS CN0,05 ARC II 30 min Block	30	8,3	14220	5,9	16	22	5
SCS CN0,05 UR 30 min Block	30	10,4	16770	7,3	12	26	1
SCS CN0,05 LR 60 min Block	60	7,2	18060	5,1	23	44	1
SCS CN0,05 ArC II 60 min Block	60	8,2	20652	5,8	23	43	3
SCS CN0,05 UR 60 min Block	60	9,8	23940	6,9	18	48	1
ZEMOKOST 20 min Block SZ +0 KB m	20	18,8	25117	13,2	13	13	2
ZEMOKOST 30 min Block SZ +0 KB m	30	19,2	36148	13,5	14	21	5
ZEMOKOST 60 min Block SZ +0 KB m	60	14,4	51442	10,1	17	47	2
ZEMOKOST 30 min Block SZ +6, KB m	30	15,2	25572	10,8	21	16	2
ZEMOKOST 30 min Block SZ +6, KB u	30	15,6	21554	11,0	19	16	1
ZEMOKOST 30 min Block SZ +6, KB o	30	14,7	29591	10,4	21	17	1
ZEMOKOST 30 min Block SZ -6, KB m	30	21,9	46601	15,4	8	26	2
ZEMOKOST 30 min Block SZ -6, KB u	30	20,3	39714	14,3	7	26	1
ZEMOKOST 30 min Block SZ -6, KB o	30	23,0	53468	16,2	8	27	1
ZEMOKOST 30 min Block SZ +-0, KB u	30	18,3	30663	12,9	13	21	3
ZEMOKOST 30 min Block SZ +-0, KB o	30	19,5	41574	13,8	14	22	3

Um den Basiswert-Bemessungswert für ein 100-jährliches Ereignis zu erhalten, werden die Abflussspitzen gewichtet (von 1 bis 5, Tab. 8.29) und daraus der gewichtete Scheitelabfluss des Basis-Bemessungsereignisses errechnet. Die höchste Gewichtung (5) erhalten die Ergebnisse der Standardvarianten beider Modelle, die Gewichtung 3 wird den Ergebnissen der Standardvarianten von HEC-HMS für die Dauerstufen 20 und 60 Minuten sowie den ZEMO-KOST-Ergebnissen für den Klassenbereich unten und oben für den Systemzustandsindex 0 vergeben. Die geringeren Gewichtungen (2) erhalten die Szenarien von ZEMOKOST des mittleren Klassenbereiches aller Dauerstufen. Die kleinste Gewichtung (1) wird für die Ergebnisse des unteren und oberen Unsicherheitsbereichs von HEC-HMS und für die Ergebnisse der Systemzustände +6 bzw. -6 für den unteren und oberen Klassenbereich angewendet. Somit erhalten die Ergebnisse der Modelle mit den Standardannahmen die höchste Gewichtung. Diese wird kleiner, je mehr die hydrologischen Modellannahmen vom Standard abweichen.

$$\bar{Q}_{p,gew} = \frac{\sum_i (Q_{p,i} \cdot g_i)}{\sum_i g_i}$$

$$s_{gew} = \sqrt{\frac{\sum_i (\bar{Q}_{p,gew} - Q_{p,i})^2 \cdot g_i}{(\sum_i g_i) - 1}}$$

$\bar{Q}_{p,gew}$	gewichteter Scheitelabfluss [m ³ /s]
$Q_{p,i}$	berechneter Scheitelabfluss der Varianten [m ³ /s]
g_i	Gewichtungen ($1 \leq g \leq 5$)
s_{gew}	gewichtete Standardabweichung der Unsicherheit [m ³ /s]

Basiswert-Bemessungswert eines 100-jährlichen Ereignisses

Der Basis-Bemessungswert ($Q_{p,gew}$) berechnet sich zu 14,5 m³/s, die Standardabweichung (s_{gew}) beträgt 5,1 m³/s, das untere Quartil liegt bei 10,5 und das obere Quartil bei 19,4 m³/s. Dies bedeutet Abflussspenden von im Mittel 10,2 m³/s.km², die Quartile belaufen sich auf 7,4 bzw. 13,7 m³/s.km².

Um die für den ermittelten Basisabfluss-Bemessungswert entsprechende Abflussfracht zu erhalten, werden alle berechneten Frachten, die auf die 10-fache Dauerstufe beschränkt werden, mit der Dauerstufe (in Sekunden) normiert. Dadurch erhält man einen Wert ($Q_{(V/D)}$) der Einheit [m³/s], der einem über die Dauerstufe gemittelten konstanten Abfluss entspricht. Trägt man diese Werte der unterschiedlichen Varianten gegen den jeweiligen Scheitelwert des Abflusses auf, lässt sich für die Dauerstufen von 20 bis 60 Minuten eine lineare Regression durch den Nullpunkt mit Q_p als unabhängige und $Q_{(V/D)}$ als abhängige Variable berechnen (Abb. 8.40).

$$Q_{\left(\frac{V}{D}\right)} = \frac{V_A(D)}{D}$$

$$\hat{Q}_{\left(\frac{V}{D}\right)} = m \cdot Q_p(D)$$

$V_A(D)$	(Direkt-)Abflussfracht der Dauerstufe D [m ³]
$Q_p(D)$	Scheitelabfluss der Dauerstufe D [m ³ /s]
D	Dauerstufe [Sekunden]
$Q_{(V/D)}$	mit der Dauerstufe normierte Abflussfracht der Dauerstufe D [m ³ /s]
m	Anstieg der Regressionsgeraden durch den Nullpunkt (Tab. 8.30)

Da die Regressionsgeraden der beiden Modelle etwa gleiche Anstiege (m , Tab. 8.30) haben, braucht keine getrennte Anpassung durchgeführt werden, um die Prognosegüte zu verbessern.

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^N (V_A(D) - \hat{V}_A(D))^2 / N \right]^{0,5}$$

Tab. 8.30 Steigung der Regressionsgeraden (m) und Prognosegüte Abflussfracht

Modell	Anzahl Werte	m	RMSE [m ³]
HEC-HMS	9	1,1145	8161
ZEMOKOST	11	1,0885	4753
Alle Ergebnisse	20	1,0932	6340

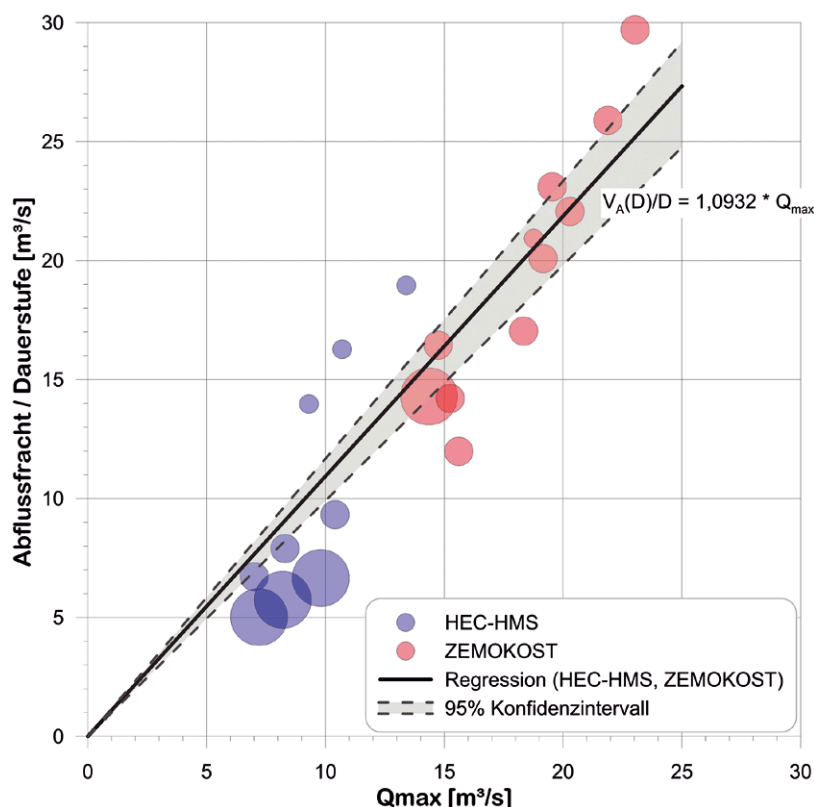


Abb. 8.40 Gegenüberstellung der auf die Dauerstufe normierten Abflussfracht mit dem Scheitelabfluss der Berechnungen, lineare Regression durch den Nullpunkt und 95-%-Konfidenzintervall. Dauerstufe 20 Minuten als kleiner Radius, 30 Minuten als mittlerer Radius und 60 Minuten als großer Radius dargestellt

Die Abweichungen der Frachten aller Berechnungsvarianten von den mit der Regression geschätzten Frachten liegen überwiegend im Bereich von $\pm 5000 \text{ m}^3$ (Abb. 8.41).

$$\hat{V}_A(D) = D \cdot (m \cdot Q_p(D))$$

$$\hat{V}_A(D) = D \cdot (1,0932 \cdot Q_p(D))$$

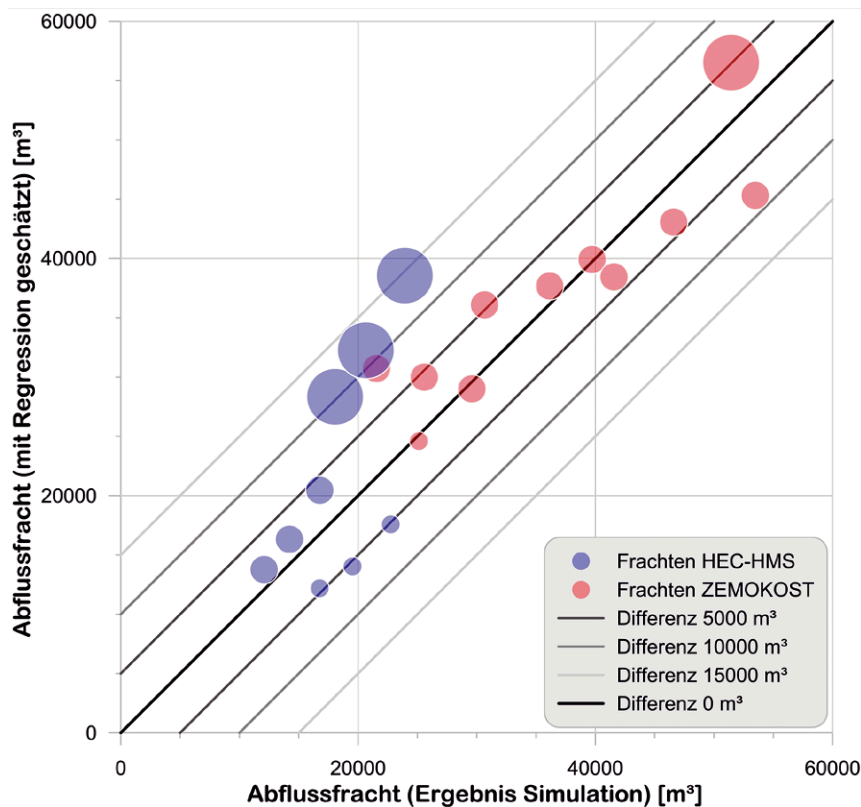


Abb. 8.41 Gegenüberstellung berechneter Abflussfrachten verschiedener Szenarien mit den geschätzten Abflussfrachten, Dauerstufe 20 Minuten als kleiner Radius, 30 Minuten als mittlerer Radius und 60 Minuten als großer Radius dargestellt

Die Fracht für den Basis-Bemessungsabfluss kann auf Basis dieser Regression abgeschätzt werden. Da die Abstraktionszeit zwischen 7 und 23 Minuten, die Anstiegszeit bei rund 25 Minuten liegt, kann die Dauerstufe (D) mit 30 Minuten angenommen werden.

$$\hat{V}_A(D) = 60 \cdot D \cdot (1,0932 \cdot \bar{Q}_{p,gew})$$

Abflussfracht für den Basiswert-Bemessungswert eines 100-jährlichen Ereignisses

Die Abflussfrachten für den Basis-Bemessungsabfluss berechnen sich für den mittleren Bemessungsabfluss zu 28478 m³, für die Quartile zu 20661 bzw. 38174 m³.

Um für den Basis-Bemessungswert die entsprechende Ganglinie darzustellen, wird das in Kapitel 3.3.4. beschriebene Verfahren angewendet (Abb. 8.42).

Tab. 8.31 Werte zur Berechnung der dimensionslosen Ganglinie

Formfaktor SF [-]	1,0293
PRF (SI Units)	15,246
PRF (Imp. Units)	590
$\Phi(\alpha)$	0,915
α	5,418

Der PRF von rund 600 (Tab. 8.31) entspricht den Empfehlungen des NRCS (Natural Resources Conservation Service, vormals SCS, 1972), der diesen Wert für steile und gebirgige Einzugsgebiete vorschlägt.

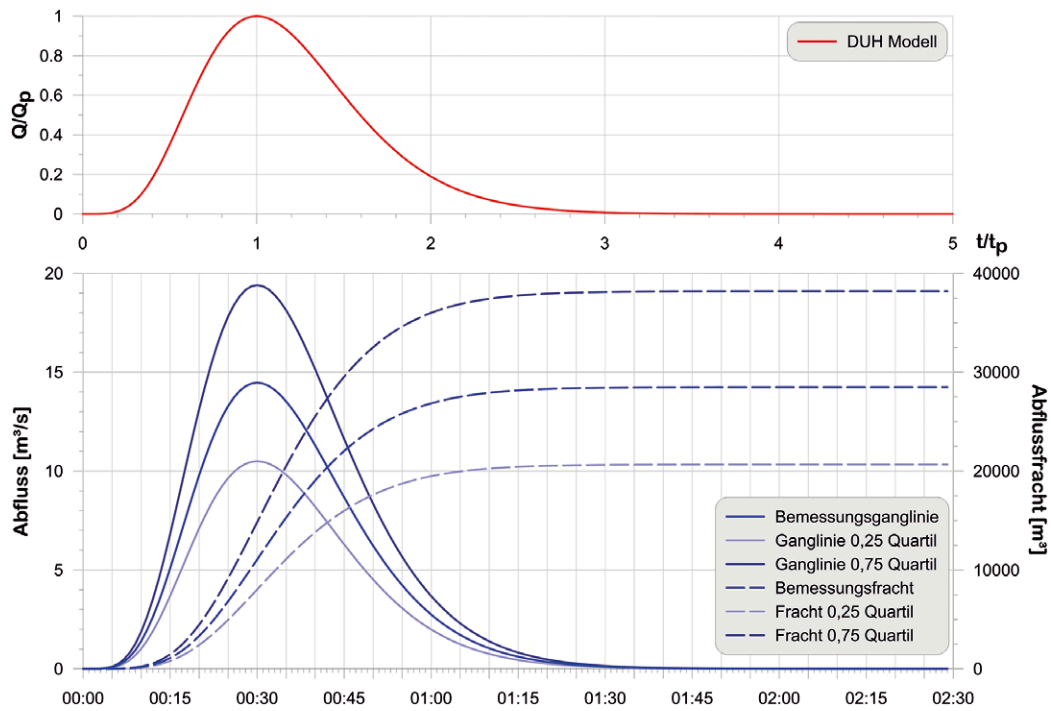


Abb. 8.42 Dimensionslose Einheitganglinie für das Bemessungsereignis (HQ_{100}) am Rumpelgraben und daraus entwickelte Ganglinie und Abflussfracht, Zusätzliche Information über die Schwankungsbreite der Ergebnisse durch Darstellung der 0,25- und 0,75-Quartile

Der Vergleich mit den Ergebnissen der HEC-HMS- und ZEMOKOST-Standardvarianten für die Dauerstufe 30 Minuten zeigt, dass die Quartile in etwa den Ergebnissen von HEC-HMS und ZEMOKOST entsprechen. Der Anstieg und Abfall der Ganglinie entspricht etwa der von ZEMOKOST und ist steiler als der von HEC-HMS (Abb. 8.43). Die Abflussfrachten liegen deutlich über den HEC-HMS-Ergebnissen, der obere Quartil-Wert der Frachten des Basis-Bemessungswerts erreicht etwa die Fracht der Standardvariante von ZEMOKOST (Abb. 8.44).

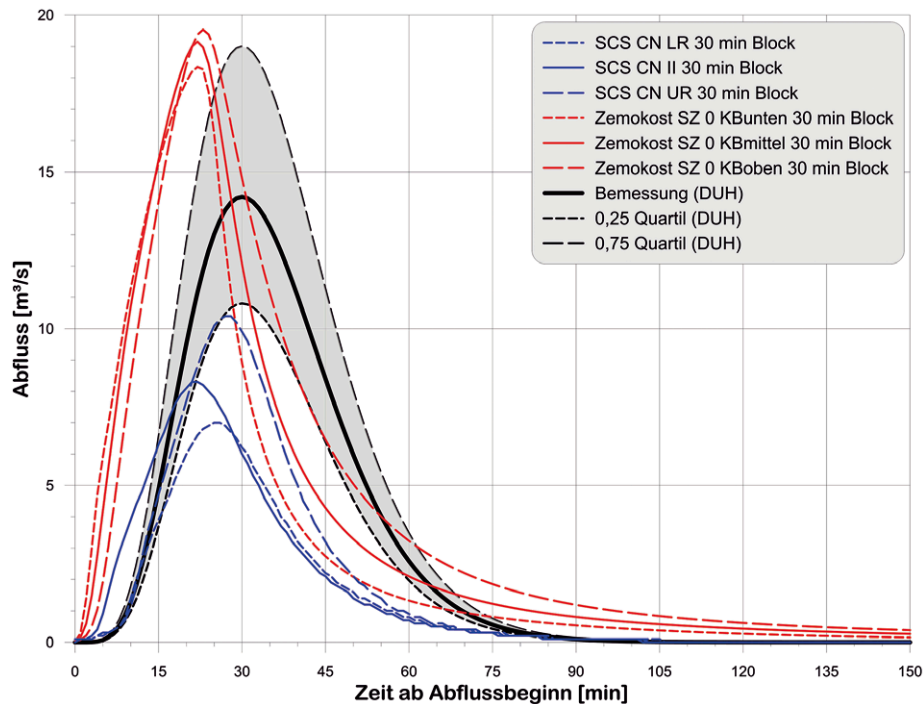


Abb. 8.43 Ganglinie des Basis-Bemessungsereignisses im Vergleich zu HEC-HMS- und ZEMOKOST-Simulationsergebnissen mit Standardannahmen

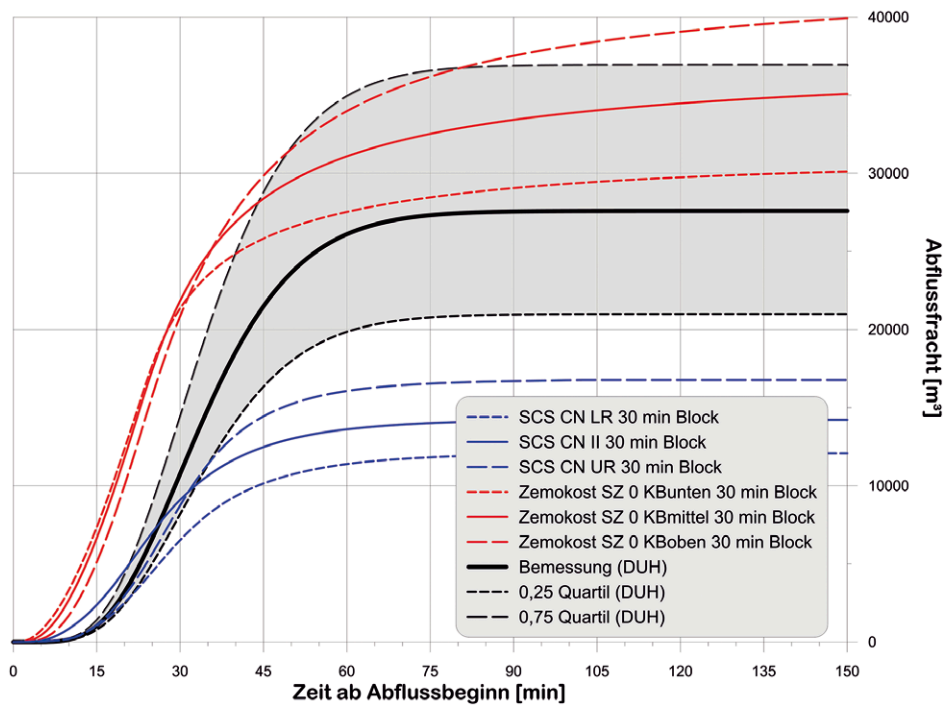


Abb. 8.44 Abflussfrachten des Basis-Bemessungsereignisses im Vergleich mit HEC-HMS- und ZEMOKOST-Simulationsergebnissen mit Standardannahmen

Vergleicht man den ermittelten Basis-Bemessungswert des 100-jährlichen Ereignisses mit den Ergebnissen der Plausibilisierung (Tab. 8.32), so zeigt sich eine weitgehend gute Übereinstimmung. Der Bemessungswert ($Q_p = 14,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $V_A \approx 28500 \text{ m}^3/\text{s}$) unterscheidet sich nur geringfügig von den Plausibilisierungswerten.

Tab. 8.32 Abflussscheitel, Frachten, Abflussspenden, Abstraktions- und Anstiegszeiten aus der Plausibilisierung

Szenario	Dauerstufe D [min]	Abflussspitze Q_p [m^3/s]	Abflussfracht [m^3]	Abflussspende H_q [$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$]	Abstraktionszeit [min]	Anstiegszeit t_{An} [min]	Gewichtung g [-]
DUH Bergthaler	20	16,7	32100	11,8		20	
DUH Bergthaler	30	12,9	37100	9,1		30	
Wundt (GF 10)		12,3		8,7			

Eine zusammenfassende Darstellung bietet Abb. 8.45. Sie zeigt

- einen Datenauszug des Wildbach- und Lawinenkatasters von Ereignissen in österreichischen Wildbächen einer Größe von 1 bis 100 km^2 für den Zeitraum 1893 bis 2018 von denen Abflussscheitelwerte dokumentiert waren,
- die Scheitelabflüsse am Lattenbach (2006) und Rumpelgraben (2016),
- die Resultate der Simulationen,
- die Ergebnisse der Plausibilisierung
- sowie den Basis-Bemessungswert mit der 25. und 75. Quartile.

Die Abflussspenden des Wildbach- und Lawinenkatasters zeigen natürlich eine große Streuung, die meisten Hochwasserspenden liegen jedoch im Bereich des Gebietsfaktors von 7,5 bis 13,8. Die Berechnungsergebnisse der Simulationen mit HEC-HMS und ZEMOKOST sind auch diesem Bereich zuzuordnen, obwohl das obere Quartil des Bemessungswerts deutlich

über dem Gebietsfaktor 13,8 liegt. Die Abflusspende des Bemessungswerts entspricht etwa den Abflusspenden der dokumentierten Prozesse (Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport). Größere Abflusspenden resultieren aus murartigen Prozessen. Der Gebietsfaktor nach Wundt beläuft sich für den Bemessungsabfluss auf 11,7 und weicht somit nicht sehr vom vorab angenommen Gebietsfaktor von 10 ab. Die Ergebnisse der Plausibilisierung liegen innerhalb des vom unteren und oberen Quartil abgegrenzten Bereichs.

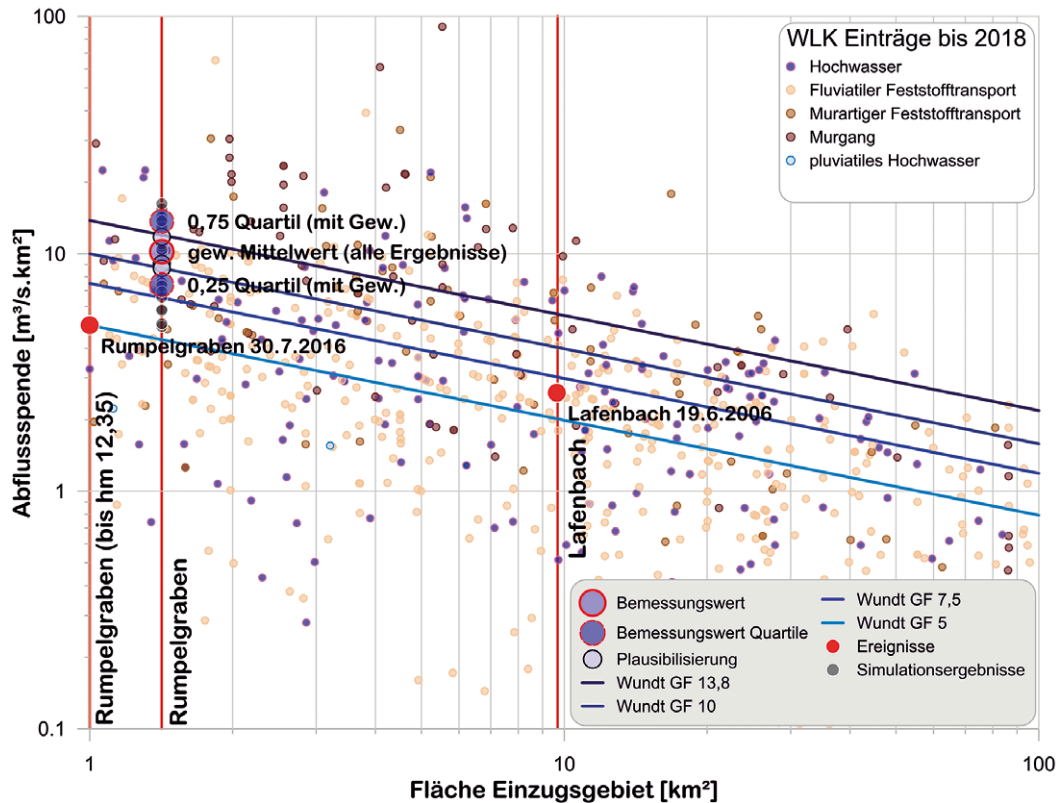


Abb. 8.45 Zusammenfassende Darstellung der Simulationsergebnisse, der Ereignisgrößen, der Plausibilisierung und der Bemessung für den Basis-Bemessungsabfluss am Rumpelgraben sowie dokumentierte Abflusspenden aus dem Wildbach- und Lawinenkataster

6.2. Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

6.2.1. Bewertung und Interpretation der Ergebnisse

Die Ermittlung des Basis-Bemessungswerts eines 100-jährlichen Bemessungsereignisses in einem unbeobachteten Einzugsgebiet wird durch die verwendeten Gebietseigenschaften, die angesetzten meteorologischen Größen, die benützten Modelle und die angewandten Modellparameter stark beeinflusst. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen eine dementsprechende Schwankungsbreite. Da keine Daten zur Kalibrierung und Validierung zur Verfügung stehen, kommt der Plausibilisierung ein großer Stellenwert zu. Bestenfalls liegen sogar Scheitelwerte aus einer Ereignisdokumentation vor, sodass eine Plausibilisierung erfolgen kann.

In diesem Beispiel wurden die Programme HEC-HMS und ZEMOKOST für die Simulation verwendet, da sie in der Praxis häufig angewendet werden. Die Gebietseigenschaften wurden flächenhaft vorhandenen Datensätzen entnommen und durch Feldbegehungen verifiziert bzw. angepasst. Die meteorologischen Eingangsgrößen entsprechen den „mittleren Bemessungsniederschlägen“ der Jährlichkeit 100 Jahre aus eHYD für die Dauerstufen von 20 bis 60 Minuten. Die Abflussbestimmung folgt für ZEMOKOST der provisorischen Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen, für HEC-HMS dem SCS-Verfahren, wobei die „initial abstraction ratio“ mit 0,05 angenommen wurde, um dem derzeitigen Stand des Wissens zu entsprechen.

Die Simulationen erfolgten für die angenommenen Dauerstufen mit den Standard-Modellparametern. Mit diesen Parameterwerten und einem aufgezeichneten Niederschlag wurde das Ereignis am Rumpelgraben vom 30. Juli 2016 berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell HEC-HMS den aus der Dokumentation rückgerechneten Scheitelabfluss nicht erreicht, das Modell ZEMOKOST den Scheitelwert geringfügig überschätzt. Das gleiche Verhalten zeigen die Simulationsergebnisse, wenn man die mittleren Bemessungsniederschläge als Eingangswerte verwendet. Zusätzlich wurden in HEC-HMS die Ganglinien für den unteren und oberen Unsicherheitsbereich und mit ZEMOKOST die Systemzustände +6 bzw. -6 mit dem oberen und unteren Klassenbereich simuliert.

Unabhängig von den gewählten Systemzuständen und Klassenbereichen errechnet ZEMOKOST stets deutlich höhere Abflussscheitel und Abflussfrachten als HEC-HMS. Dies ist vor allem auf die Umrechnung des Modellparameters λ (initial abstraction ratio) von 0,2 auf den Wert 0,05 zurückzuführen, da somit auch die CN-Werte verringert werden müssen. Die berechneten Abflussbeiwerte in ZEMOKOST sind ungefähr doppelt so hoch wie in HEC-HMS, damit können auch die gegenüber HEC-HMS höheren Frachten von ZEMOKOST erklärt werden. Die Abflussreaktion ist mit ZEMOKOST deutlich rascher als mit HEC-HMS, die Form des absteigenden Astes der Ganglinien ist für beide Modelle ähnlich.

Aufgrund der großen Streuung der Simulationsergebnisse erfolgt die Ermittlung des Basis-Bemessungswerts für das 100-jährliche Bemessungsereignis durch eine Gewichtung der berechneten Scheitelwerte, wobei die größte Gewichtung die Simulationsergebnisse der Standardvarianten erhalten (**Box 6.2**). Der mit diesem Verfahren berechnete Abflussscheitel beläuft sich auf 14,5 m³/s und entspricht etwa auch den Ergebnissen der Plausibilisierung (12,3 bis 16,7 m³/s). Der daraus resultierende Gebietsfaktor (nach Wundt) beträgt 11,7 und liegt in einem für steile Wildbäche plausiblen Bereich. Um die diesem Bemessungswert entsprechende Abflussfracht zu ermitteln, wird eine Regression berechnet, die die berechneten Frachten der auf die Dauerstufe normierten Fracht gegenüberstellt. Die Abflussfracht des Bemessungsereignisses kann mit rund 28500 m³ angegeben werden.

Mit den berechneten hydrologischen Kennwerten kann durch die Anwendung einer dimensionslosen Ganglinie eine Bemessungsganglinie abgeleitet werden, die in etwa zwischen den Simulationsergebnissen von HEC-HMS und ZEMOKOST liegt. Wird als Eingangswert das obere Quartil des Bemessungsabflusses eingesetzt, ergibt sich eine Ganglinie, die etwa den Ganglinien von ZEMOKOST des SZI 0 entspricht, wählt man das untere Quartil des Bemessungsabflusses, errechnet sich eine Ganglinie, die etwa dem oberen Unsicherheitsbereich von HEC-HMS entspricht. Die Abflussfracht des Bemessungsereignisses liegt deutlich über den mit HEC-HMS ermittelten Werten, ist aber kleiner als das mit ZEMOKOST simulierte Ergebnis. Die Quartilwerte umfassen etwa den Bereich, der auch mit den Standardwerten von ZEMOKOST errechnet wird, die Frachten von HEC-HMS liegen jedoch deutlich darunter.

Mit der in diesem Beispiel gewählten Vorgangsweise kann ein Basis-Bemessungswert für den Abflussscheitel und die Abflussfracht eines 100-jährlichen Bemessungsereignisses ermittelt und der Schwankungsbereich abgegrenzt werden. Weiters lässt sich unter Anwendung einer dimensionslosen Ganglinie die Ganglinie des Bemessungsereignisses darstellen.

6.2.2. Bewertung der Qualität mittels Checkliste

Eine Bewertung zur Darstellung der Durchführung der Modellierung und der Qualität der Ergebnisse bei Projektende wurde durchgeführt. Diese Bewertung ergab für die Kapitel 2. bis 6. eine Einschätzung der Qualität von gering/mittel, und eine Einschätzung des Aufwands von mittel. Die Checkliste ist diesem Beispiel beigelegt.



Checkliste zum ÖWAV Regelblatt 220 - Niederschlag-Abflussmodellierung

Dient zur Darstellung der Projektanforderungen für Auftragsvergaben vor Projektbeginn (vorher) sowie zur Darstellung der Durchführung der Modellierung und der Qualität der Ergebnisse bei Projektende (nachher).

Projekttitle:	<input type="text" value="Rumpelgraben HQ100"/>
Projektziel:	<input type="text" value="Bemessungsereignis HQ100 (Reinwasser)"/>
Vorlage für:	Institution / BearbeiterIn:
Projektanforderung / Vergabe (vorher): <input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
Projektbewertung (nachher): <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="Universität für Bodenkultur, WLV"/>

Mit dieser Entscheidungs- und Bewertungshilfe sollen im Sinne des Regelblattes rasch klare Vorgaben und Anforderungen an die Niederschlag-Abflussmodellierung dargestellt werden, z. B. im Zuge einer Ausschreibung oder Angebotslegung, sowie nach Abschluss der Modellierung eine zusammenfassende Gesamtbewertung erfolgen. Sie soll Transparenz schaffen, welcher Leistungsumfang erforderlich ist, und welche Qualität damit erreicht wird. Der Aufwand, der Kosten-Nutzen Faktor und die Qualität der Berechnungen sollen damit klarer kommuniziert werden.

Beachten Sie die jeweiligen einblendbaren Empfehlungen - Boxeninhalte des Regelblattes. Detailinformationen sind dem Regelblatt selbst zu entnehmen.

Digitale Bearbeitung / Download: www.oewav.at

1. Aufgabenstellung

Die Gliederung nach Aufgabenstellung und Gebietstyp fokussiert die Ausgangslage, den Modellierungsschwerpunkt, und den Projektumfang. Sind Einzelereignisse von Interesse, der kontinuierliche Verlauf des Abflusses oder statistische Aussagen? Sind spezielle Gegebenheiten, wie z.B. Retention oder Veränderungen zu berücksichtigen? Stehen Extremwerte oder der Wasserhaushalt im Vordergrund der Berechnungen?

1. Generell	Generelle Vorgabe				
	HQ Bemessung	Wasserbewirtschaftung	Prognose	Analysen	
	Generelle Aufgabenstellung:				
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
1. Detailliert	Detaillierte Beschreibung				
		Gebirge (Wildbach)	Ländliches Gebiet	Städtisches Gebiet	<i>Empfehlung</i>
	Hochwasserbemessung – Ereignisse / HQn-Scheitelwerte:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.1
	Hochwasserbemessung – Wellenscharen und -volumen:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Hochwasserbemessung – Retentionsberechnungen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Risikoanalyse – Gefahrenzonenplanung / Restrisiko:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Wasserbewirtschaftung – Berechn. von kont. Abflüssen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Wasserbewirtschaftung – Wasserhaushaltskomponenten:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Wasserbewirtschaftung – Spezielle Niederwasserberechnungen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Abflussprognosen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Analyse von Veränderungen – Klima, Landnutzung, ...:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Sonstiges (siehe Anmerkungen):	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Anmerkungen:	Prozess Murgang, daher Reinwasser untergeordnet.				
	HK1	HK2	HK3		
Klassifizierung nach Hydrologischen Kategorien:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.2	
Argumentation:	Geringes bis mittleres Schadenspotenzial, einfache hydrologische Verhältnisse.				

2. Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen

Die Festlegung des Modells und die erreichbare Qualität hängen wesentlich von den verfügbaren Eingangsdaten ab, daher sollten die Daten bereits im Vorhinein erhoben oder gesichtet werden. Spiegeln sich aufwändige Daten auch in einem genaueren Modellergebnis wieder? Welche Gebietsdaten liegen vor bzw. sind erforderlich? Sind zusätzliche Erhebungen erforderlich? Welche Niederschlags- und Pegelaufzeichnungen etc. liegen im Einzugsgebiet, in der Umgebung und in der Region vor? Welche Qualität weisen die Daten auf? Sind Daten von großen Ereignissen vorhanden? Welche statistischen Hochwasserkenngößen liegen vor bzw. sind im Zuge des Projektes zu ermitteln, und wie kann eine Informationserweiterung die Qualität der Ergebnisse verbessern?

2. Generell	Generelle Vorgabe	
	Gewässer / Stelle(n):	Rumpelbach / Mündung
	Zubringer zu:	Angerbach
	Gebiet:	Gasteiner Ache

	<p>Fläche [km²]: <input style="width: 80%;" type="text" value="1,31"/></p>																										
	<p>Daten lokal erheben Daten regional erheben</p>																										
	<p>Auswahl und Aufbereitung von Eingangsgrößen: <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>																										
	<p>Daten zur Verfügung stellen/gestellt: <input style="width: 80%;" type="text" value="HD Salzburg, Liftgesellschaft"/></p>																										
	<p>Datenprüfung: <input style="width: 80%;" type="text" value="plausibilisieren"/></p>																										
2. Detailliert	<p>Detaillierte Beschreibung</p> <p>2.1 Gebietsüberblick und Gebietseigenschaften</p>																										
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;"></th> <th style="width: 15%;">Ohne Geschiebe</th> <th style="width: 15%;">Geschiebe</th> <th style="width: 15%;">Murartiger Abfluss</th> <th style="width: 15%;">Murgang</th> <th style="width: 10%;">Empfehlung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ereignisklassifizierung nach ONR24800:</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;">2.1</td> </tr> </tbody> </table>		Ohne Geschiebe	Geschiebe	Murartiger Abfluss	Murgang	Empfehlung	Ereignisklassifizierung nach ONR24800:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.1														
		Ohne Geschiebe	Geschiebe	Murartiger Abfluss	Murgang	Empfehlung																					
	Ereignisklassifizierung nach ONR24800:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.1																					
	<p><i>Daten und Erhebungen</i></p>																										
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;"></th> <th style="width: 15%;">Laserscan</th> <th style="width: 15%;">Vermessung</th> <th style="width: 15%;">Andere</th> <th style="width: 15%;">Keine Daten (indirekt)</th> <th rowspan="5" style="width: 10%;"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Topographie EZG:</td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Gewässernetz:</td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Kanalnetz:</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Gerinneprofile:</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>		Laserscan	Vermessung	Andere	Keine Daten (indirekt)		Topographie EZG:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gewässernetz:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Kanalnetz:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gerinneprofile:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Laserscan	Vermessung	Andere	Keine Daten (indirekt)																						
	Topographie EZG:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																						
	Gewässernetz:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																						
	Kanalnetz:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																						
	Gerinneprofile:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																						
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;"></th> <th style="width: 30%;">berücksichtigen</th> <th style="width: 30%;">nicht berücksichtigen</th> <th style="width: 10%;">keine</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Zu- / Ableitungen:</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>		berücksichtigen	nicht berücksichtigen	keine	Zu- / Ableitungen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																		
		berücksichtigen	nicht berücksichtigen	keine																							
	Zu- / Ableitungen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																							
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;"></th> <th style="width: 20%;">Detaillierte vorhandene Karten</th> <th style="width: 15%;">Feldbegehung</th> <th style="width: 20%;">Nachbar EZG regional</th> <th style="width: 10%;">Keine Daten (indirekt)</th> <th rowspan="3" style="width: 10%;"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Geologie:</td> <td><input style="width: 80%;" type="text" value="Karte 1 : 25000"/></td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input style="width: 80%;" type="text"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Boden:</td> <td><input style="width: 80%;" type="text" value="Karte 1 : 25000"/></td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input style="width: 80%;" type="text"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Vegetation / Landnutzung:</td> <td><input style="width: 80%;" type="text" value="Corine, DKM"/></td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input style="width: 80%;" type="text"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>		Detaillierte vorhandene Karten	Feldbegehung	Nachbar EZG regional	Keine Daten (indirekt)		Geologie:	<input style="width: 80%;" type="text" value="Karte 1 : 25000"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input style="width: 80%;" type="text"/>	<input type="checkbox"/>	Boden:	<input style="width: 80%;" type="text" value="Karte 1 : 25000"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input style="width: 80%;" type="text"/>	<input type="checkbox"/>	Vegetation / Landnutzung:	<input style="width: 80%;" type="text" value="Corine, DKM"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input style="width: 80%;" type="text"/>	<input type="checkbox"/>					
	Detaillierte vorhandene Karten	Feldbegehung	Nachbar EZG regional	Keine Daten (indirekt)																							
Geologie:	<input style="width: 80%;" type="text" value="Karte 1 : 25000"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input style="width: 80%;" type="text"/>	<input type="checkbox"/>																							
Boden:	<input style="width: 80%;" type="text" value="Karte 1 : 25000"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input style="width: 80%;" type="text"/>	<input type="checkbox"/>																							
Vegetation / Landnutzung:	<input style="width: 80%;" type="text" value="Corine, DKM"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input style="width: 80%;" type="text"/>	<input type="checkbox"/>																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;"></th> <th style="width: 15%;">Geländeanleitung (Geländebegehung)</th> <th style="width: 15%;">Regionalisierung</th> <th style="width: 15%;">Abflussbeiwerte aus der Literatur</th> <th style="width: 30%;">Andere</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abflussbeiwerte:</td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input style="width: 80%;" type="text"/></td> </tr> </tbody> </table>		Geländeanleitung (Geländebegehung)	Regionalisierung	Abflussbeiwerte aus der Literatur	Andere	Abflussbeiwerte:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input style="width: 80%;" type="text"/>																	
	Geländeanleitung (Geländebegehung)	Regionalisierung	Abflussbeiwerte aus der Literatur	Andere																							
Abflussbeiwerte:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input style="width: 80%;" type="text"/>																							
<p>Anmerkungen: <input style="width: 90%;" type="text"/></p>																											
<p>2.2 Niederschlag und andere meteorologische Messgrößen</p>																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;"></th> <th style="width: 15%;">Messdaten im EZG</th> <th style="width: 15%;">Abschätzdaten im EZG</th> <th style="width: 15%;">Messdaten Nachbar EZG</th> <th style="width: 15%;">Regional</th> <th rowspan="4" style="width: 10%;"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Niederschlags (Tagessummen):</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Niederschlag (hochaufgelöst):</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Schnee:</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Temperatur (Tages/hochaufgelöst):</td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>		Messdaten im EZG	Abschätzdaten im EZG	Messdaten Nachbar EZG	Regional		Niederschlags (Tagessummen):	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niederschlag (hochaufgelöst):	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Schnee:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Temperatur (Tages/hochaufgelöst):	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Messdaten im EZG	Abschätzdaten im EZG	Messdaten Nachbar EZG	Regional																							
Niederschlags (Tagessummen):	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																							
Niederschlag (hochaufgelöst):	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																							
Schnee:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																							
Temperatur (Tages/hochaufgelöst):	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																							

Checkliste zum ÖWAV Regelblatt 220 - Niederschlag-Abflussmodellierung

Strahlung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Verdunstung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Maßgebende Messstationen:	Station der Liftgesellschaft am Stubnerkogel; Bad Gastein, Böckstein, Bucheben				
	Detailliert geprüft	Grob geprüft	Plausibilisiert	Keine	Empfehlung
Prüfung Niederschlag:	HD Salzburg		Daten Liftgesell.	<input type="checkbox"/>	2.4
	MaxMod Niederschlag	Gewicht. Bem.-niederschlag	ÖKOSTRA Stationsstatistik		
Niederschlagshöhe: eHyd	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		2.5
	Niederschlag Statistik	Anpassung an HQn	Monte Carlo generierter N.		
Niederschlagshöhe: Andere	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
	Aus beob. Ereignissen	End- / Anfangs- / Mittenbetont	Doppelereignis	Block	
Zeitl. Niederschlagsverteilung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.6
	Sanft	Sanft modifiziert	Stark	Keine	
Flächenabminderung N.:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.7
	Aus beob. Ereignissen	Detailliert verteilt	Einfach verteilt	Keine / räuml. konstant	
Räumliches Muster, Gebietsn.:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.8
	Stationsdaten	Fernerkundung	Höhenabhängigkeit		
Räumliche Interpolation Schnee, Lufttemperatur, Verdunstung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		2.9
Niederschlagsprognosen, Klimawandel:					2.10
Anmerkungen:					

2.3 Abfluss

	Messdaten im EZG	Abschätzdaten im EZG	Messdaten Nachbar EZG	Regional	
Abflussscheitel v. Ereign.:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.11
Abflussgangl. von Ereignissen:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Langzeit Abflussganglinien:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
(nur) Wasserstand:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Historische Ereignisse / Stumme Zeugen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Maßgebende Messstationen / Ereignisstellen:	Lafenb., Angerb. Schizentrum; Rumpelbach hm12.35; Pegel Böckstein, Bucheben, Hof Gastein				

	Detailliert geprüft	Grob geprüft	Korrigiert	Plausibilisiert	Empfehlung
Prüfung und Korrektur Abfluss:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.12
Ereignisdokumentation:	<input type="text" value="HW 19.06.2006 am Lafenbach; HW 30.07.2016 am Rumpelgraben"/>				2.13
	Durchführen	Übernehmen von	Infoerweiterung	HORA	
Hochwasserabflussstatistik:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.14
Statistische Unsicherheiten ermitteln / angeben:	Konfidenzintervalle		Regionale Schwankungsbereiche		
	<input type="text"/>		<input type="text"/>		
	Über Pegelstatistik absichern	Retentionseffekte berechnen	Über Jährlichkeit der Zubringer plausibilisieren	Einfache Hqn-Interpolation (Spende)	
Hqn-Längenschnitt / Retentionseffekte:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Anmerkungen:	<input type="text" value="Vergleich mit regionalen Wundt-Abflussspenden bzw. regionalen statistischen Gebietsfaktoren"/>				

Bewertung

Argumentation:

Einstufung Qualität Eingangsdaten:

Geschätzter Aufwand:

Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung
Eingangsdaten	sehr gering	Keine hydrometeorologischen Daten verfügbar.
	gering	Hydrometeorologische Daten in Nachbargebieten für die Plausibilisierung verfügbar. Bei kleinen Gebieten werden Gebietskenngrößen ohne Feldbegehungen auf Basis benachbarter Gebiete oder regionaler Karten einfach bestimmt.
	mittel	Hydrometeorologische Daten im Einzugsgebiet verfügbar, deren Qualität geprüft wurde. Für Hochwasserfragen sind lokale Reihen mit mittleren Hochwässern sowie regional übertragbare Informationen verfügbar, zudem Niederschlagshöhen und Hochwassermarken. Gebietskenngrößen aus Bodenkarten etc. mit stichprobenartiger Überprüfung durch Feldbegehungen in kleinen Gebieten.
	hoch	Langjährige hydrometeorologische Daten an repräsentativen Stellen im Einzugsgebiet, mit zeitlicher Auflösung entsprechend der Prozessdynamik verfügbar. Umfangreiche Messdatenprüfung und Pegelschlüsselprüfungen. Für Hochwasserfragen sind lange lokale Reihen mit großen Hochwässern sowie regional übertragbare Informationen verfügbar. Detaillierte Gebietskenngrößen, bei kleinen Gebieten aus Feldbegehungen. In städtischen Gebieten detaillierte befestigte Flächen und Kanalsystem. Topographie und Abflussraum aus Vermessungsdaten oder Laserscan.

3. Modellwahl (Modellkonzepte)

Grundsätzlich sind die Modellwahl und Struktur nach folgenden Kriterien festzulegen: Wird die Aufgabenstellung mit dem Modell erfüllt? Entspricht die Datenlage den Modellanforderungen und werden die relevanten Prozesse mit dem Modell erfasst? Wie gut ist die praktische Erfahrung des Modellierers (Referenzen) und ist der Aufwand aufgrund der Datenlage/Kriterien gerechtfertigt? Erforderlichenfalls sollten auch verschiedene Varianten überlegt und bewertet werden.

3. Generell	Generelle Vorgabe				
	Modellwahl:	Ereignisbasiert <input checked="" type="checkbox"/>		Kontinuierlich <input type="checkbox"/>	
3. Detailliert	Detaillierte Beschreibung				
	3.1 Kriterien für die Modellwahl				
	Gewähltes NA-Modell:	HEC-HMS (SCS); ZEMOKOST			Empfehlung 3.1
	Gew. Modell – Kriterien Check:	Aufgabenstellung <input checked="" type="checkbox"/>	Datenerford. und -verfügbarkeit <input checked="" type="checkbox"/>	Relevante hydrol. Prozesse <input type="checkbox"/>	
	3.2 Modelltypen und Gliederung				
	Kausalität des Modells:	White-Box <input type="checkbox"/>	Grey-Box <input checked="" type="checkbox"/>	Black-Box <input type="checkbox"/>	3.2
	Flächengliederung des EZG:	Raster <input type="checkbox"/>	Teileinzugsgebiete <input checked="" type="checkbox"/>	Halbverteilt (HRUs) <input type="checkbox"/>	3.3
	Anzahl der Teilflächen / Auflösung:		6		
	Zeitliche Gliederung:	Kontinuierlich <input type="checkbox"/>	Ereignis-basiert <input checked="" type="checkbox"/>	Zeitliche Aufl. <input type="checkbox"/>	3.4
	Nachführungsalgorithmen (Prognosemodelle):	Erforderlich <input type="checkbox"/>	Nicht erforderlich <input checked="" type="checkbox"/>		3.5
	3.3 Berechnungsansätze				
	Ansatz – Interzeption:	einfach			3.6
	Ansatz – Verdunstung:	keine			
	Ansatz – Schnee:	keine			
	Abflussbeiwerte / Verlustraten:	Physikalisch <input type="checkbox"/>	Konzeptionell <input checked="" type="checkbox"/>	Vereinfacht <input type="checkbox"/>	3.7
Ansatz – Abflussbeiwerte / Verlustraten:	SCS - CN ; ZEMOKOST Geländeanleitung			3.8	
Ansatz – Abflusskonzentration:	UH			3.9	

				Empfehlung
	Hydraulisch (1D, 2D)	Hydrol.- detailliert	Hydrol.-einfach / lumped	keine
Fließstrecken zwischen Knoten:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Retentionsbecken:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3.10				
Anmerkungen: <input style="width: 100%;" type="text"/>				
Bewertung				
Argumentation: <input style="width: 100%;" type="text"/>				
Einstufung Qualität Modellstruktur: <input style="width: 150px;" type="text" value="mittel"/>				
Geschätzter Aufwand: <input style="width: 150px;" type="text" value="mittel"/>				
Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung		
Modellstruktur	sehr gering	Keine NA Modellierung im eigentlichen Sinn, Verwendung von Faustformeln und vereinfachten NA Beziehungen		
	gering	Konzeptionelle Beschreibung der wichtigsten Prozesse stark vereinfacht und räumlich aggregiert		
	mittel	Alle relevanten Prozesse sind im Modell zumindest konzeptionell abgebildet. Die zeitliche und räumliche Auflösung ist zur Beschreibung der Prozesse ausreichend. Gewisse Kompromisse bei Modellstruktur zur Vereinfachung		
	hoch	Modellstruktur für Aufgabenstellung ideal geeignet. Die Berechnungsansätze des Modells entsprechen den maßgebenden NA Prozessen im EG, und dies wird begründet. Alle Prozesse in ausreichender zeitlicher und räumlicher Auflösung abgebildet. Anm: Es ist nicht sinnvoll ein detailliertes NA Modell zu betreiben wenn die Datenlage dies nicht unterstützt!		

4. Wahl der Modellparameterwerte

Mit der Kalibrierung des NA Modells soll gewährleistet werden, dass die hydrologischen Prozesse der Natur (Abflussbildung, Abflusskonzentration, Routing, Retention, ...) im Modell richtig abgebildet werden. Bilden die vorhandenen Daten/Ereignisse eine gute Kalibrierbasis entsprechend der Aufgabenstellung? Sind Übertragungen aus regionalen NA-Analysen/Ereignissen erforderlich? Welche Prozesse/Parameter haben einen maßgebenden Einfluss auf die Ergebnisse und sind daher prioritär zu betrachten? Verbessert eine Feldbegehung die Qualität des Modells und die Ergebnisse? Sind die Parameter für Gebiete ohne Abflussmessungen bzw. geänderte Bedingungen zutreffend?

4. Generell	Generelle Vorgabe			
	A priori	Kalibrierung am Abfluss	Regionale Übertragung	
	Modellparameter: <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4. Detailliert	Detaillierte Beschreibung			
	4.2 Vorgangsweise bei der Parameterwahl			
	Verwendung Zusatzinformation	Abstimmung auf EZG-Typ	DPC Konzept (Dominante Prozesse)	
	Vorgangsweise: <input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.1 4.2 4.3

Checkliste zum ÖWAV Regelblatt 220 - Niederschlag-Abflussmodellierung

4.3 A priori Parameter

	Detaillierte Feldbegehung	Teilbegehung	Abflussdaten	Empfehlung
Prozessanalysen:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.4
	Feldbegehung	Gebietseigenschaften	Regional	4.5
Apriori Parameter:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.6

4.4 Parameterkalibrierung am Abfluss

Keine Kalibrierung:	<input type="checkbox"/>	EZG / Pegel	
Lokal, direkt im EZG:	<input type="checkbox"/>	Ereignis Lafenbach 2006; Ereignis Rumpelbach 2016	
Regional, an ähnliche Nachbar EZGe (Anzahl)	1		

	klein	mittel	groß
HQ-Ereignisgrößen:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Länge kont. Abflusszeitreihen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Erzielte Anpassungsgüte an den Abfluss

	gering	mittel	groß	
Jahresabfluss:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.8
Abflussscheitel:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ganglinien:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

	manuell	automatisch	Reduktion Überparametrisierung	
Kalibrierung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.9
				4.10
				4.11

4.5 Parameter für Gebiete ohne Abflussdaten

	Reg. Kalibrierung	Reg. Parameter aus externen Analysen	Feldanleitung a priori	Karten; Studien; a priori	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.12

	Darstellen	Nicht darstellen
Detaillierte Bewertung der Übertragung:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

4.6 Parameter für geänderte Bedingungen

	Berücksichtigen	Nicht berücksichtigen	
Landnutzung:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.13
Klimaänderung:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.14

Anmerkungen:

Bewertung

Argumentation:

Einstufung Qualität Parameterwahl:

Geschätzter Aufwand:

Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung
Parameterwahl	sehr gering	Keine gemessenen Abflussdaten im Gebiet, keine Feldbegehung, Literaturwerte für Parameter
	gering	Keine gemessenen Abflussdaten im Gebiet. Parameterwahl aufgrund von Feldbegehung und Erfahrungswerten. Oder: regionalisierte Parameter aus Pegeln mit geringer/mittlerer Übertragbarkeit
	mittel	Mehrere gemessene Abflussereignisse mittlerer Größe bzw. mehrere Jahre Abflussdaten bei kontinuierlichen Modellen. Oder: regional ermittelte Parameter von mehreren Pegeln mit sehr guter Übertragbarkeit. Oder bei Kleinstenzugsgebieten: detaillierte Feldmessungen (z.B. Beregnung). In allen Fällen Feldbegehungen
	hoch	Kalibrierung an mehreren gemessenen großen Abflussereignissen bzw. bei kontinuierlichen Modellen an langen gemessenen Abflusszeitreihen. Alle für die Aufgabenstellung zu erwartenden Charakteristiken der Ereignisse sind im Modellierungsdatensatz enthalten. Zusätzlich gute Modellanpassung erzielt.

5. Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung

Mit der Validierung wird überprüft, ob dem Modell auch in der Anwendungssituation vertraut werden kann. Wurde eine Validierung mit von der Kalibrierung unabhängige Abflussdaten durchgeführt? Wie ist die Simulationsgüte für den Validierungsdatensatz? Wie sind die Ergebnisse der Modellplausibilisierung für unbeobachtete EGe? Wurden, für den Fall von Hochwassersimulationen, HQn spezifische Modellparameter gewählt? Wurden das NA-Modell und die Hochwasserstatistik in Abhängigkeit der vorhandenen Datenqualität aufeinander abgestimmt? Sind die Ergebnisse der regionalen Einordnung plausibel und interpretierbar?

5. Generell	Generelle Vorgabe				
		Validierung	Plausibilisierung		
	NA-Modell:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
		HQn-Kalibrierung	HQn Informationserweiterung		
	HQn-spezifische Aspekte:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
5. Detailliert	Detaillierte Beschreibung				
	5.1 Modellvalidierung an Abflussdaten (Zeitraum der nicht Teil der Kalibrierung ist)				
		Durchführen	Nicht durchführen	<i>Empfehlung</i>	
	Validierung:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	5.1	
	Validierungszeitraum:	Zeitabschnitt	Anzahl der Ereignisse	Ereignisse unterschiedlicher Größe	
		<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	5.2

Checkliste zum ÖWAV Regelblatt 220 - Niederschlag-Abflussmodellierung

	Gütemaße Bias	Einfache, optische Bewertung	Bewertung Qs, V Einzelereignisse	
Güteprüfung der Validierung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<i>Erzielte Validierungsgüte des Abflusses</i>				
	gering	mittel	Groß	
Jahresabfluss:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Abflussscheitel:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ganglinien:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Umgang mit schlechten Validierungsergebnissen:	<input type="text"/>			Empfehlung 5.3
Anmerkungen:	<input type="text"/>			
5.2 Plausibilisierung von Modellen in unbeobachteten Einzugsgebieten				
	Sättigungsfl.	Erosionsspuren	Schnee	HW-Marken
Ländliche Gebiete:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Ereignis-Chronik	Stumme Zeugen	Dendromorphol. Hinweise	
Wildbach-Gebiete:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	ÖWAV-Regelblatt 11,19	Beobachtungen / Überläufe	Vergleich mit anderen Netzen	
Städtische Einzugsgebiete:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Anmerkungen:	<input type="text"/>			
5.3 Spezielle Aspekte bei Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeiten (HQn)				
Relevante Niederschlagsdauerstufen [h]:	<input type="text" value="0,3; 0,5; 1,0 Stunden"/>			5.5
	Gleich der Abflussjährlichkeit	Anpassung an HQ-Statistik	Andere	
Jährlichkeit des Bemessungsniederschlags:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5.6
Vorgangsweise bei HQn-spez. Modellparametern:	<input type="text"/>			5.7
	gut	mittel	schlecht, keine	Regionale Informationserweiterung
Qualität / Datenlage HQ-Statistik:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Qualität / Datenlage NA-Ereignisse:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	HQn-Kalibrierung	Ereignis Kalibrierung	A priori Parameter	5.8
Gewählte Methodik:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	5.9
				5.10

	Spenden Hq	Hq / VD-Direktabfluss-volumen / EZG-Darstellung	<i>Empfehlung</i>
HQn spezifische regionale Einordnung:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	5.11
Anmerkungen: <input style="width: 100%;" type="text"/>			
5.4 Modellanwendung			
	Durchführen	Nicht durchführen	
Begründung der Lastfälle / Szenarien:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5.12
Anmerkungen: <input style="width: 100%;" type="text"/>			
Bewertung			
Argumentation: <input style="width: 100%;" type="text"/>			
Einstufung Qualität Validierung / Modell-Plausibilisierung:		<input style="width: 100%;" type="text" value="gering / mittel"/>	
Geschätzter Aufwand:		<input style="width: 100%;" type="text" value="mittel"/>	
Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung	
Validierung und Modell-Plausibilisierung	sehr gering	Keine Validierung, vage Plausibilitätsindikatoren. HQn spezifisch: a priori Kalibrierung ohne regionale Informationserweiterung	
	gering	Keine Validierung, nur Plausibilisierung, gute Plausibilitätsindikatoren (z.B. stumme Zeugen; unabhängige regionale Vergleiche) HQn spezifisch: a priori Kalibrierung mit regionaler Informationserweiterung (HQ Statistik oder HQn spez. Parameter)	
	mittel	Validierung an beobachteten Abflussganglinien für unabhängigen Zeitraum oder Einzelereignisse im Gebiet und angemessene Modellgüte bei der Validierung. Oder: Hohe Validierungsqualität an einem nahen Unterlieger- oder Oberliegerpegel. HQn spezifisch: Ereignis Kalibrierung mit regionaler Informationserweiterung (HQ Statistik oder HQn spez. Parameter)	
	hoch	Validierung an beobachteten Abflussganglinien für langen, unabhängigen Zeitraum (von NQ bis HQ) oder mehrere Einzelereignisse unterschiedlicher Größe im Gebiet und hohe Modellgüte bei der Validierung. Qn spezifisch: HQn Validierung oder Ereignis-Validierung im Gebiet mit guter Datenbasis und hoher Modellgüte, mit regionaler Informationserweiterung (HQ Statistik oder HQn spez. Parameter)	

6. Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse

Für die Interpretation der Modellergebnisse ist vor allem bei geringer Datenlage eine Unsicherheits- bzw. Sensitivitätsanalyse bzw. Plausibilisierung der Ergebnisse sehr vorteilhaft. Was ändert sich an den Ergebnissen bei unterschiedlichen Parameterannahmen oder durch Einbeziehung von Ergebnissen anderer Verfahren?

6. Generell	Generelle Vorgabe		
		Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen	Zusammenfass. Bewertung
Interpretation und Berichte:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Detaillierte Beschreibung

6.1 Unsicherheits- / Sensitivitätsanalysen

	Eingangsdaten	Parameter	Modellstruktur	Interpretation	Empfehlung
Sensitivitätsanalyse:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6.1

6.2 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse und Checkliste

	Checkliste vorher	Checkliste nachher	Detaillierte hydrol. Interpretation	Detaillierte hydrol. Bewertung	
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	6.2

6.3 Berichtslegung an Auftraggeber

	Im Detail nachvollziehbar	Überblicksweise nachvollziehbar	Gliederung gemäß Regelblatt	
Bericht:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6.3
	Präsentation(en)		Digitale Archivierung aller Informationen	
Informationsmanagement:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Source Daten freigeben	

Anmerkungen:

Bewertung

Argumentation:

Einstufung der Qualität:

Geschätzter Aufwand:

Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung
Unsicherheiten	sehr gering	Keine Unsicherheits- bzw. Sensitivitätsanalyse und keine Interpretation
	gering	Einfache Sensitivitätsanalyse, mögliche gegenseitige Beeinflussung von Parametern wird nicht untersucht. Einfache Interpretation der Ergebnisse
	mittel	Sensitivitätsanalyse einschließlich Beurteilung der Abhängigkeit von Parametern, und Untersuchung verschiedener Szenarien. Weitergehende Interpretation der Ergebnisse und ihrer Unsicherheiten. Checkliste vorher und nachher ausgefüllt. Bericht im Detail nachvollziehbar
	hoch	Detaillierte Unsicherheitsanalyse z.B. basierend auf Monte Carlo Simulationen mit Festlegung von Unsicherheitsbandbreiten. Umfassende Interpretation und Bewertung der Ergebnisse und ihrer Unsicherheiten in Hinblick auf Prozesse und Datensituation. Checkliste vorher und nachher ausgefüllt. Bericht im Detail nachvollziehbar. Vollständiges Informationsmanagement (Präsentationen, Digitale Archivierung aller Informationen, Source Daten freigeben).

6. Detailliert

Zusammenstellung der Bewertung

Projekttitle:

Rumpelgraben HQ100

	Einstufung / Bewertung	
	Qualität	Aufwand
Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen (Kapitel 2):	gering / mittel	mittel
Modellwahl (Modellkonzepte) (Kapitel 3):	mittel	mittel
Wahl der Modellparameterwerte (Kapitel 4):	gering	mittel
Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung (Kapitel 5):	gering / mittel	mittel
Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse (Kapitel 6):	mittel	mittel

Anmerkungen:

Da Prozess Murgang ist, hat Reinwasser eher eine untergeordnete Bedeutung!

Synthesebeispiel Pram

Autor: Günter Humer

1. Aufgabenstellung

Gemeinsam mit der Erstellung des Gefahrenzonenplans Obere Pram wurde das Ingenieurbüro Günter Humer vom Gewässerbezirk Grieskirchen mit der Erstellung eines N-A-Modells für das ganze Prameinzugsgebiet beauftragt. Der Zweck des N-A-Modells ist es, Bemessungsabflüsse und Abflusswellen mit Jährlichkeit n detailliert an zahlreichen Stellen im Einzugsgebiet unter Berücksichtigung der Retention zu ermitteln (Aufgabenstellung nach **Box 1.1**). Dazu wurde das Modell an einem seltenen Ereignis kalibriert, an einem weiteren validiert und dann mit verschiedenen Bemessungsregen beaufschlagt. Aus den Bemessungsabflüssen und Abflusswellen wurde dann mit dem Auftraggeber ein Bemessungsszenario für die hydraulischen Berechnungen festgelegt. Bei der Gefahrenzonenplanung an der Pram handelt es sich um eine Fragestellung mit mittlerem Schadenspotenzial und mittelkomplexen hydrologischen Verhältnissen; demnach wurde die hydrologische Kategorie nach **Box 1.2** zu 2 eingestuft.

2. Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen

2.1. Gebietsüberblick und Gebietseigenschaften

2.1.1. Landschaftliche Einordnung

Die Pram ist ein Fluss im oberösterreichischen Alpenvorland ähnlich wie die Waldzeller Ach oder die Mattig, welche in den Unterlauf des Inn münden. Sie sind geprägt von Sommerhochwässern infolge lokaler oder regionaler Niederschläge oder Winterhochwässern ausgelöst durch Tauwetter/Regen auf Schnee. Als Prozess ist Reinwasserabfluss maßgeblich, Geschiebetransport erfolgt nur in geringem Ausmaß (**Box 2.1**).

2.1.2. Topografie, Gewässernetz, wasserwirtschaftliche Maßnahmen

Die Größe des Einzugsgebietes (EZG) beträgt 384 km², der nördliche Teil (ein Viertel) des EZG liegt im Kristallin des Sauwaldes und der südliche im Bereich der Molassezone (drei Viertel). Die Pram entspringt in St. Marienkirchen und Haag in den Ausläufern des Hausrucks (ca. 750 m ü. A.) im Süden, fließt Richtung Nordwest und mündet nach 60 km Fließlänge bei Schärding in den Inn (Seehöhe 300 m ü. A.), der nach ca. 20 km bei Passau in die Donau mündet. Im Norden befindet sich der Sauwald, dessen Höhen sich bis 800 m ü. A. erheben. Die Pramniederung ab etwa Dorf/Pram liegt auf einer Höhe von 300 – 370 m ü. A. Der Jahresniederschlag liegt zwischen 1150 mm/a in Hausruck und Sauwald und 870 mm/a in der Pramniederung.

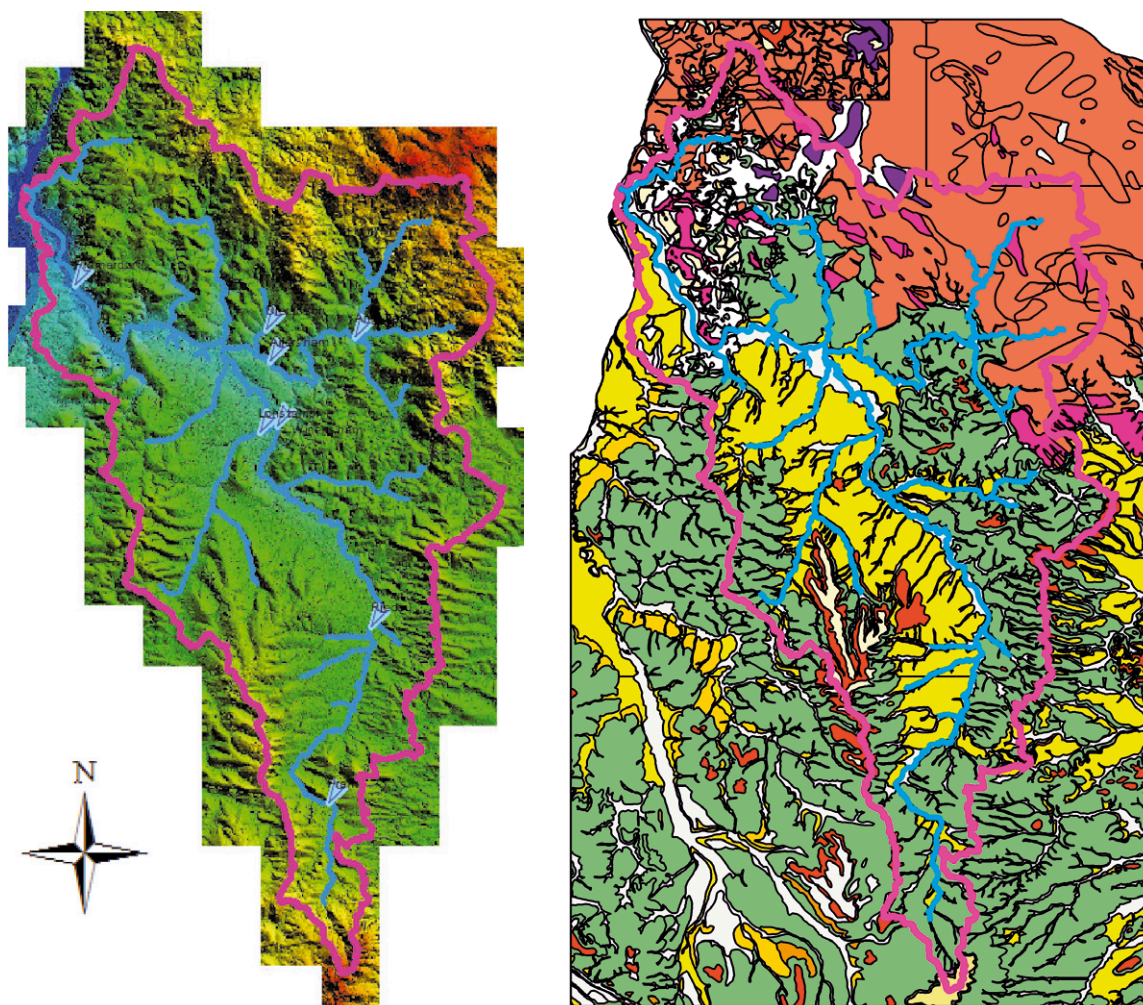


Abb. 8.46 links: Relief des Prameinzugsgebiets, Auslass bei 300 m im Nordwesten des Gebiets, die höchsten Ausläufer in rot reichen bis 800 m. Rechts: Geologie des Prameinzugsgebiets: grün und gelb: Schlier und Quartär, dunkelrot und violett: Kristallin des Sauwalds (Datenquelle: Amt der OÖ Landesregierung)

Ein digitales Geländemodell (DEM) bildete die Basis für die Erstellung des flächendetaillierten hydrologischen Modells. Es wurde der 1-m-Laserscan (Datenquelle: Amt der OÖ Landesregierung, Flugdatum 2006) verwendet und zur GIS-Bearbeitung auf 2 x 2 m ausgedünnt.

Der Verlauf der Gewässer wurde mit dem Preprocessing-Programm aus dem Geländemodell errechnet, die erhaltenen Linien wurden manuell anhand des Berichtsgewässernetzes, der Orthofotos (Datenquelle: Amt der OÖ Landesregierung, 2006) und der DKM korrigiert und wieder in das Preprocessing-Programm übernommen. Daran anschließend konnten die Eigenschaften der Gewässerstrecken (Gefälle) und der Teileinzugsgebiete (Schwerpunkt, längste Fließlänge, Gefälle derselben, mittleres Gebietsgefälle etc.) abgeleitet werden. Das Hauptgewässer wurde auf der ganzen Länge begangen (**Box 2.2**). Ein großer Teil des Hauptgewässers ist reguliert, die Zubringer in weiten Teilen nicht. Ein größeres Hochwasserrückhaltebecken war im Gebiet vorhanden, ein zweites ist gerade in Bau.

2.1.3. Geologie, Boden

Die hydrologischen Eigenschaften werden vom Boden und Relief charakterisiert. Der Boden ist aus dem liegenden Gestein entstanden, daher bietet die Geologie einen guten generellen Überblick.

Die Quellbereiche im Hausruck entspringen den dortigen Schottern, dann verläuft die Pram im größten Bereich im Innviertler Schlierhügelland, das aus den tertiären Tonmergeln (Schlier, grün in der Geologischen Karte) aufgebaut wird. In einzelnen höheren Lagen lagern pleistozäne Schotter auf diesem Schlier auf (orange Bereiche in Abb. 8.46). Der nordöstliche Teil des Einzugsgebietes wird von Kristallin des Sauwalds aufgebaut (rot in Abb. 8.46).

Der Bodenaufbau konnte an verschiedenen Stellen in Form von Aufschlüssen im Zuge von anderen Projekten oder privaten Ausflügen festgestellt werden.

2.1.4. Vegetation, Landnutzung

Vegetation und Landnutzung wurden ebenfalls aus vorhandenen digitalen Daten (DKM, Luftbild, CORINE) entnommen und stichprobenartig im Zuge von Begehungen überprüft.

2.1.5. Kombinierte Informationen: Abflussdisposition, Abflussbeiwerte

Es sind keine entsprechenden Kartierungen oder Daten bekannt. Da das vorgesehene Modell keine derartigen Parameter verwendet, wurden keine speziellen Kartierungen durchgeführt.

2.2. Niederschlag und andere meteorologische Größen

2.2.1. Erhebung und Auswahl von Stationsdaten

Dem Regelblatt in **Box 2.3** und **Box 2.8** folgend sollen möglichst alle Niederschlagsstationen im Gebiet verwendet werden, unabhängig von der zeitlichen Auflösung. Die im Projektgebiet liegenden Regenstationen decken das Untersuchungsgebiet nicht gut ab, sodass auch umliegende Stationen herangezogen wurden. Entsprechend der Empfehlung des Regelblatts werden für Gebiete mit hoher Prozessdynamik hohe zeitliche Auflösungen von 5 Minuten gewählt. Zusätzlich werden auch Tagessummen für die Auswertungen herangezogen.

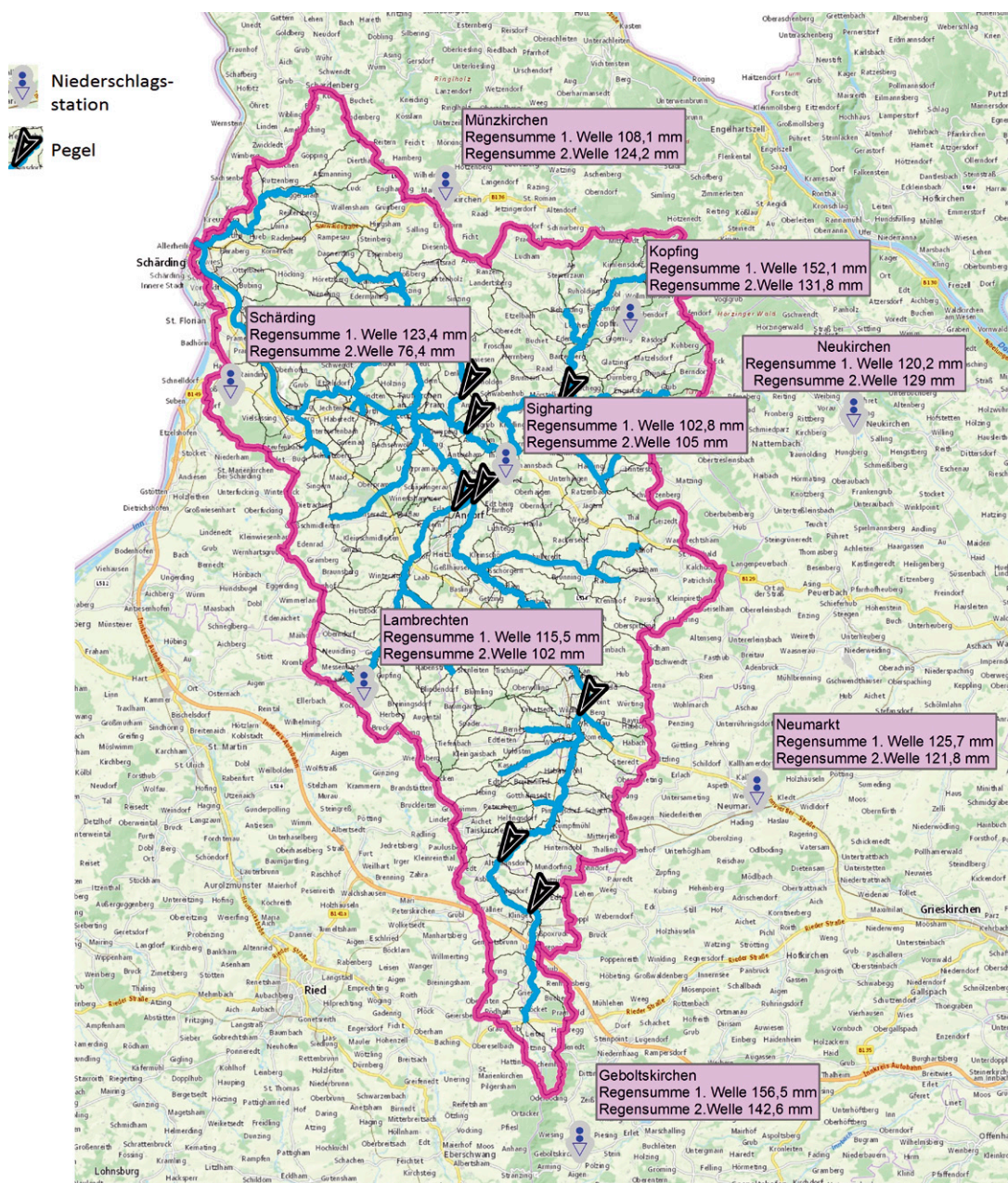


Abb. 8.47 Niederschlagsstationen und Pegel. Die Niederschlagssummen beziehen sich auf das Regenereignis beim Hochwasser 2002, Regensumme 1 vom 6.-8. August 2002, Regensumme 2 vom 11.-13. August 2002 (Datenquelle Basiskarte: basemap.at)

In Abb. 8.47 sind die nächstgelegenen meteorologischen Stationen dargestellt.

Folgende Daten wurden vom Hydrografischen Dienst zur Verfügung gestellt, Stationen ohne Klammerangaben sind Schreiberstationen:

- Schärding,
- Geboltskirchen (nur Tagessummen),
- Kopfing,
- Lambrecht (nur Tagessummen),
- Münzkirchen,
- Neukirchen,
- Neumarkt und
- Sigharting (nur Tagessummen).

2.2.2. Datenprüfung und Korrektur

Es wurden geprüfte Daten des Hydrografischen Dienstes verwendet (**Box 2.4**). Zusätzlich wurden Analysen über die Regenereignisse und Vergleiche der Stationen untereinander durchgeführt (ebenfalls **Box 2.4**). Prüfungen der Herkunft der Daten und auf etwaige systematische Fehler erfolgten nicht.

2.2.3. Niederschlagsstatistik und Bemessungsniederschläge

Wenn man die Regenmengen grundsätzlich einordnen will, kann man sie mit den ÖKOSTRA-Werten nach eHYD vergleichen. Eine Regenfracht von 100 mm in 2 Tagen entspräche einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 25-jährlich, tritt sie in 24-Stunden auf, wäre die Auftretenswahrscheinlichkeit 100-jährlich. Der Regen in Kopfing mit rund 125 – 150 mm in 24 Stunden ist als seltener als 100-jährlich einzustufen, innerhalb von 2 Tagen wäre er immer noch 100-jährlich. Die Höhe der Bemessungsniederschläge wurde entsprechend **Box 2.5** aus den eHYD-Werten abgeleitet. Es erfolgt die Anwendung einer Flächenabminderung derart, dass in den Kopfeinzugsgebieten die sanft abgeminderten Regen, im übrigen EZG die stark abgeminderten Regen verwendet wurden (**Box 2.7**).

2.2.4. Zeitliche Verteilung des Ereignisniederschlags

Im August 2002 wurden innerhalb einer Woche zwei starke Regenereignisse beobachtet.

Das Ereignis im August 2002 war ein großflächiges, langdauerndes Regenereignis mit maximalen Intensitäten von 3 mm pro 5 Minuten und 2,5 mm pro 5 Minuten beim zweiten Ereignis (siehe Abb. 8.48).

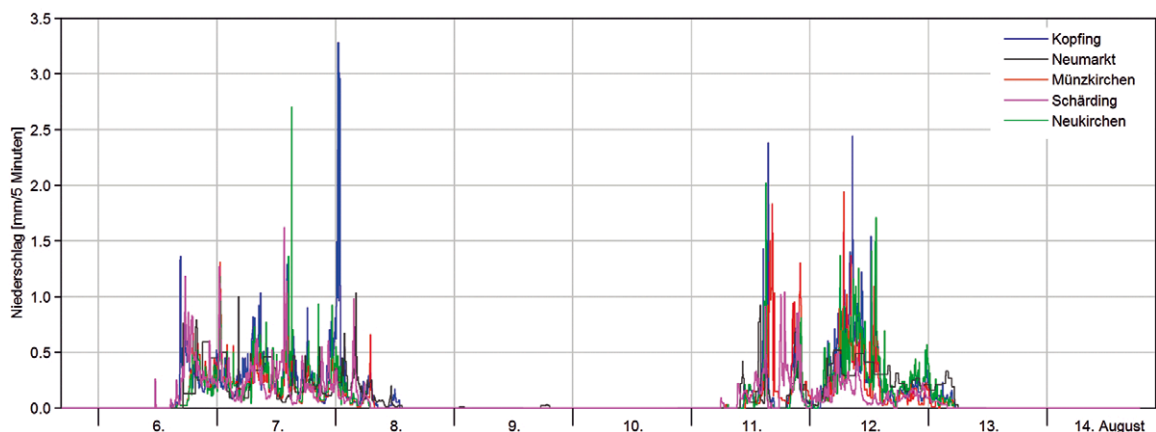


Abb. 8.48 Regenintensitäten [mm/5 Minuten] der Regenschreiber im Prameinzugsgebiet August 2002 (Datenquelle: Hydrographischer Dienst OÖ, Stand 2011)

Das Ereignis 2002 bestand aus mehreren Vorregen Ende Juli und Anfang August und einem Hochwasser am 7.-8. August und dem größeren Hochwasserereignis am 12. August 2002. Beim ersten Ereignis vom 6. bis 8. August 2002 traten wohl einzelne Spitzen der Regenintensität auf, generell ist aber eine etwa gleichmäßige zeitliche Verteilung wie bei einem Blockregen festzustellen. Beim zweiten Regenereignis vom 11. bis 12. August 2002 sind im Regenverlauf eindeutig zwei Hauptspitzen zu erkennen, denen zu Mitternacht am 12. August noch eine kleine dritte Spitze folgte. Die Regenfrachten beider Ereignisse sind an den Stationen etwa gleich, ausgenommen sind Münzkirchen, Schärding und Kopfing. In anderen Einzugsgebieten wie dem der Aschach waren die Regenfrachten beim zweiten Ereignis geringer als beim ersten, obwohl die Abflüsse überall beim zweiten Ereignis am größten waren. Die Station Kopfing (dunkelblau in Abb. 8.48) weist einen sehr intensiven Regen auf, der in den anderen Stationen nicht gemessen wurde. Es wurde entschieden, den Regen für die Kalibrierung zu verwenden und evtl. zu hohe Abflüsse aufgrund der zu großflächigen Aufbringung des Regens im Ergebnis zu interpretieren.

Zeitliche Verteilung des Bemessungsniederschlags

Die eHYD-Bemessungsregen beinhalten nur eine Angabe über die Fracht, nicht jedoch den zeitlichen Verlauf. Die in **Box 2.6** gemachten Empfehlungen wurden für einige Dauerstufen berücksichtigt, indem anfangs-, mitten- und endbetonte synthetische Regenverteilungen untersucht wurden. Entsprechend der Annahme, dass bei kurzen Regendauern die anfangsbetonten Regen die größeren Abflussspitzen ergeben und bei langdauernden Regen eher endbetonte Regen den höchsten Abflussscheitel ergeben, wurde die zeitliche Verteilung in Abstimmung mit dem Auftraggeber entsprechend gewählt. Der zeitliche Verlauf ist in der folgenden Abbildung zu sehen. Regen bis 3 Stunden Dauer wurden anfangsbetont, von 4 bis 9 Stunden mittenbetont und ab 12 Stunden Dauer endbetont angesetzt. Wie in **Box 5.5** empfohlen, wurden damit unterschiedliche Regendauern verwendet.

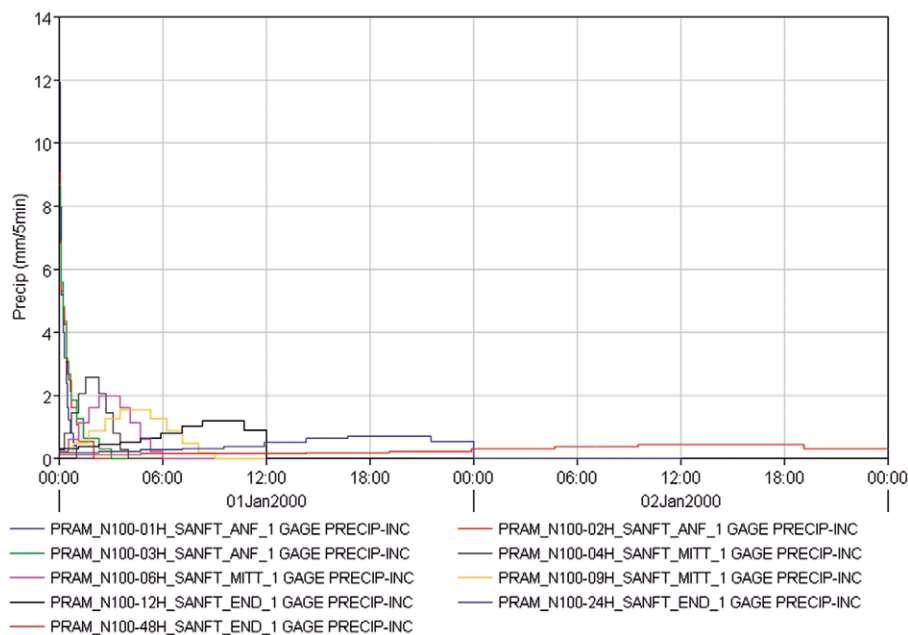


Abb. 8.49 zeitlicher Verlauf der Bemessungsregen, vorgeben vom HD. Die Regendauer ist in der Bezeichnung der Regen beinhaltet: Pram_N100-01h bezeichnet den Regen mit der Dauer 1 Stunde, sanft bedeutet sanfte Flächenabminderung; anf, mitt und end bezeichnen anfangs-, mitten- und endbetonten Regen

Kurz aufeinander folgende Doppelereignisse wurden für die Ermittlung von Bemessungsabflüssen für den Gefahrenzonenplan nicht als maßgeblich erkannt. Wenn das Modell für die Bemessung von Rückhaltebecken verwendet wird, dann wird dieser Fall jedoch sehr wohl untersucht und entsprechende Regenverteilungen werden aus den gemessenen Ereignissen abgeleitet (**Box 2.6**).

2.2.5. Räumliche Verteilung des Niederschlags

Die räumliche Verteilung wird anhand der Tagesfrachten analysiert. Die Tagesfrachten betragen zwischen 40 und 98 mm beim ersten Ereignis und 29 bis 86 mm beim zweiten Ereignis. Diese Werte und die Ereignisfrachten sind in Tab. 8.33 zu finden.

Tab. 8.33 Tagessummen (mm) der Regen an Stationen im und um das Prameinzugsgebiet

	6. Aug. 2002	7. Aug. 2002	8. Aug. 2002	11. Aug. 2002	12. Aug. 2002	Summe 6.-8.8.	Summe 11.-12.8.
Schärding	54,4	68,0	1,0	47,4	29,0	123,4	76,4
Münzkirchen	44,8	61,3	2,0	70,4	53,8	108,1	124,2
Kopfing	50,7	97,8	3,6	53,6	78,2	152,1	131,8
Neukirchen	40,2	80,0	0,0	42,7	86,3	120,2	129,0
Sigharting	41,5	59,4	1,9	55,5	49,5	102,8	105,0
Lambrecht	51,4	61,5	2,6	55,0	47,0	115,5	102,0
Neumarkt	51,0	70,0	4,7	47,8	74,0	125,7	121,8
Geboltskirchen	81,7	72,0	2,8	63,0	79,6	156,5	142,6

Anhand der Farbgebung in Tab. 8.33 wurde verdeutlicht, dass es regionale Unterschiede in der Überregnung gibt. In der Mitte des Einzugsgebietes der Pram fielen geringere Niederschläge (helleres Blau) als im Sauwald oder im Bereich des Hausruck (dunkleres Blau). Besonders geringe Niederschläge fielen in Schärding (sehr helles Blau). Ein Teil des Effekts ist durch einen Höhengradienten zu erklären, da die Stationen im Sauwald (Münzkirchen, Kopfing, Neukirchen) und am Hausruck (Neumarkt und Geboltskirchen) um bis zu mehrere hundert Meter höher liegen als die Stationen entlang der SO–NW verlaufenden Pramniederung (Schärding, Sigharting, Lambrecht), vergleiche Abb. 8.46. Eine Analyse der Regenradarbilder ergab, dass sich die Niederschläge von Nordosten kommend über den Sauwald hereindrehten und die Intensität der Zellen nach Westen deutlich abnahm. Den Hausruck streifte wiederum ein anderer Ausläufer der Regenzelle. Diese räumliche Verteilung spiegelt sich auch in den ÖKOSTRA-Daten wider und muss bei der Wahl der Bemessungsregen Beachtung finden.

Die räumliche Verteilung des Bemessungsniederschlags wurde nach der Methode (a) – Flächenabminderung aus Kapitel 2.2.5. des Regelblatts ermittelt. Die flächengeminderten Regen für sanfte und starke Abminderung wurden vom Hydrografischen Dienst bezogen.

Tab. 8.34 Bemessungsregen (mm) für die Jährlichkeit $n = 100$ mit sanfter und starker Abminderung für das ganze Prameinzugsgebiet

	Tagessummen Regendaten						
	6. Aug. 2002	7. Aug. 2002	8. Aug. 2002	11. Aug. 2002	12. Aug. 2002	Summe 6.-8.8.	Summe 11.-12.8.
Schärding	54,4	68,0	1,0	47,4	29,0	123,4	76,4
Münzkirchen	44,8	61,3	2,0	70,4	53,8	108,1	124,2
Kopfing	50,7	97,8	3,6	53,6	78,2	152,1	131,8
Neukirchen	40,2	80,0	0,0	42,7	86,3	120,2	129,0
Sigharting	41,5	59,4	1,9	55,5	49,5	102,8	105,0
Lambrecht	51,4	61,5	2,6	55,0	47,0	115,5	102,0
Neumarkt	51,0	70,0	4,7	47,8	74,0	125,7	121,8
Geboltskirchen	81,7	72,0	2,8	63,0	79,6	156,5	142,6

Schnee, Temperatur oder Luftfeuchtigkeit gehen in das gewählte Modell nicht ein und wurden daher nicht untersucht. Die Verdunstung wird in Oberösterreich nur sehr vereinzelt gemessen. Angaben dazu finden sich im Klimaatlas von Oberösterreich (Auer et al. 1998). Die Verdunstung liegt im OÖ Klimaatlas als berechnete Monatswerte vor. Schneedaten werden nicht verwendet, da aufgrund der Höhenlage nur regeninduzierte Hochwässer untersucht wurden. **Box 2.9** ist daher ohne Relevanz.

Tab. 8.35 Berechnete Verdunstungsdaten ET_p in [mm] pro Monat aus dem OÖ Klima Atlas (Auer et al. 1998)

Station	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
Waizenkirchen	0,5	6,4	29,6	59,5	92,6	102,9	110,9	94,6	61,9	32,9	11,2	2,0	605,6

2.3. Abfluss

2.3.1. Erhebung und Auswahl von Stationsdaten

Im Einzugsgebiet der Pram gibt es 8 Pegel des Hydrografischen Dienstes, wobei der kleinste ein Einzugsgebiet von 10 km², der größte fast am Auslauf des Einzugsgebietes eine Fläche von 340 km² aufweist. Auch zahlreiche Zubringer sind durch Pegelstellen erfasst. Die Beobachtungen durch den Hydrografischen Dienst begannen 1976. Es wurden gemäß **Box 2.11** alle verfügbaren Pegel verwendet.

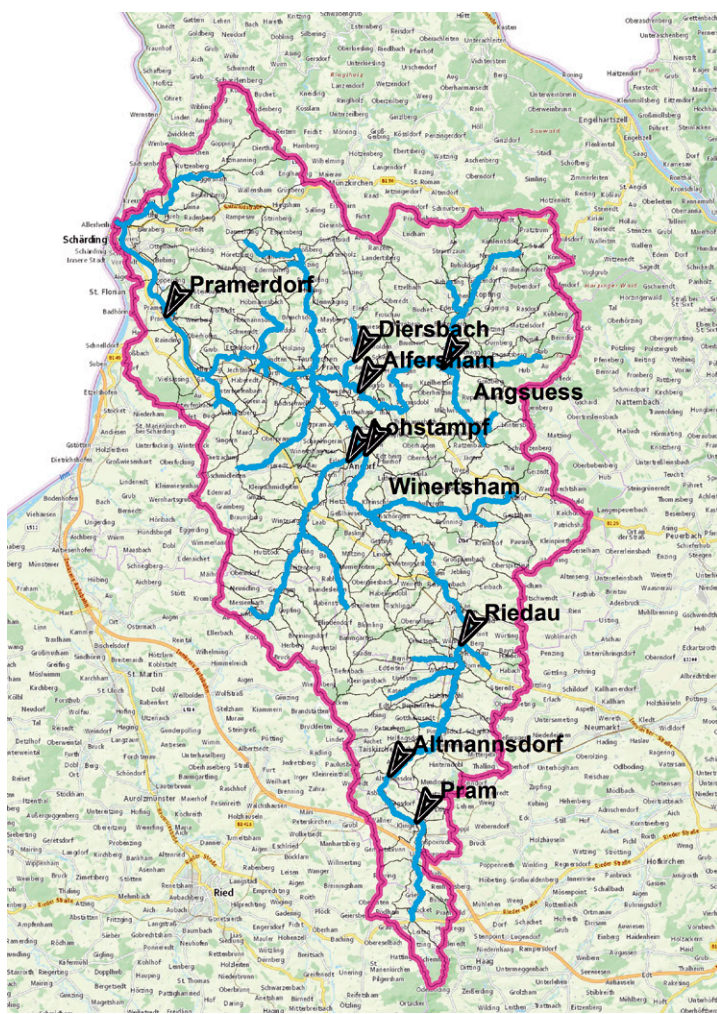


Abb. 8.50 Lage der Pegel im Einzugsgebiet (Datenquelle Basiskarte: basemap.at)

2.3.2. Datenprüfung und Korrektur

Für die Kalibrierung wurde das Hochwasser 2002 verwendet, die Validierung wurde mit dem HW 1993 durchgeführt. Besonders diese Ereignisse wurden einer Datenprüfung gemäß **Box 2.12** unterzogen. Die meisten Pegel waren auch besichtigt worden. Im Zuge anderer Projekte waren die „Eigenheiten“ wie Umläufigkeiten oder Profilstabilität der Pegel von den Sachbearbeitern des Hydrografischen Dienstes bereits erfragt worden. Die Abflüsse und die Spenden an den Pegeln sind in Tab. 8.36 dargestellt:

Tab. 8.36 Abflüsse und Spenden beim HW 2002 und HW 1993, beim Ereignis 2002 wurde der zweite Scheitel als der größere der beiden dargestellt

Pegel	EZG [km ²]	HQ2002 [m ³ /s]	Spende 2002 [m ³ /s.km ²]	HQ1993 [m ³ /s]	Spende 1993 [m ³ /s.km ²]	Anmerkung
Pram (Pram)	14,2	33,3	2,345	5,5	0,387	
Riedau (Pram)	60	43,7	0,728	37	0,617	RHB!
Winertsham (Pram)	128,1	140	1,093	65	0,507	
Lohstampf (Messenbach)	39,3	31,9	0,812	21	0,534	
Angsüß (Pfuda)	64,1	45,3	0,707	4,5	0,070	
Alfersham (Pfuda)	81,3	70,6	0,868	5	0,062	
Diersbach (Diersbach)	10,6	8,9	0,840	1,2	0,113	
Pramerdorf (Pram)	340,9	248	0,727	76	0,223	

Die Spenden der Abflüsse beim HW 2002 sind in Abb. 8.51 dargestellt. Die größten Spitzen erzeugt der zweite Teil des HW 2002 vom 11. bis 13. August 2002, auf diesen Teil beziehen sich die folgenden Analysen.

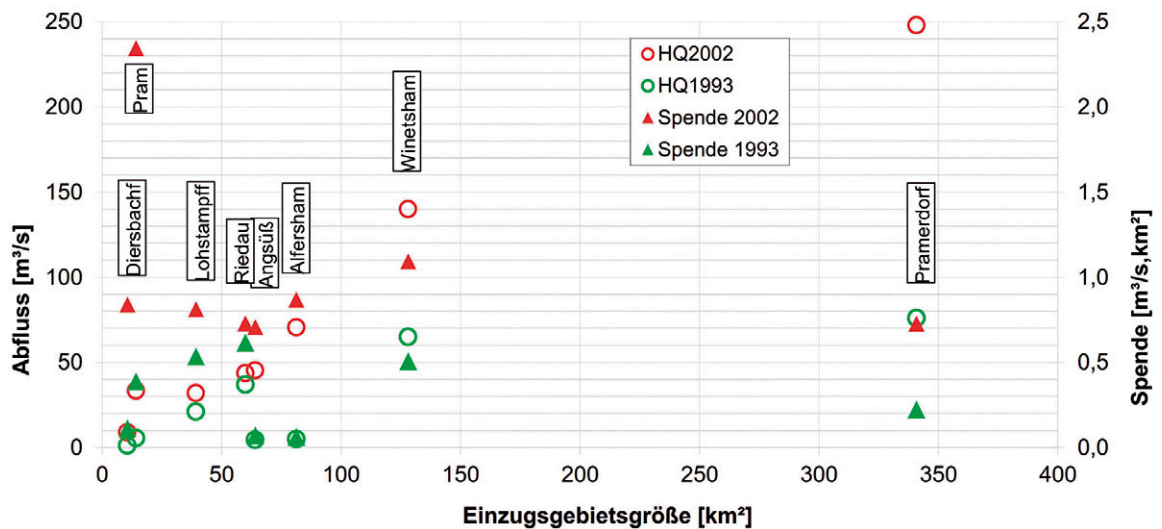


Abb. 8.51 Abflüsse (linke y-Achse) und Spenden (rechte y-Achse) der Hochwasserscheitel beim HW 2002 und HW 1993 an den Prampegeln

Generell liegen die Spenden bei etwa 0,7 bis 0,8 m³/s.km². Die mit Abstand größte Spende weist der Pegel Pram auf, der nächste unterhalb gelegene Pegel Riedau hat bedingt durch das RHB Altmanndorf eine deutlich niedrigere Spitze und Spende. Winertsham fällt von dieser generellen Aussage genauso wie Pram heraus.

Die Pegeldata stehen in 15 Minuten Auflösung zur Verfügung.

Prüfung der Wasserstands-Durchfluss-Beziehung

Zur Überprüfung der gemessenen Abflüsse wurden auch die Pegelschlüssel geprüft. Neben einer augenscheinlichen Prüfung der Schlüsselkurve erfolgte dies durch einen Vergleich mit der hydraulischen Modellrechnung. Die Pegelschlüsselkurven konnten für die Pegel Pram und Lohstampf mit einem gleichzeitig beauftragten 2D-Strömungsmodell überprüft werden (**Box 2.12**). Der Pegel Pramerdorf war bereits früher hydraulisch nachgerechnet und eine neue Schlüsselkurve festgelegt worden. Bei keinem Pegel führte die Nachrechnung zu einer Änderung des Kollektivs. Am Pegel Winertsham war eine Prüfung des Pegelschlüssels von 2002 nicht mehr möglich, weil sich durch eine unterhalb anschließende Flutmulde die Randbedingungen zu stark geändert hatten.

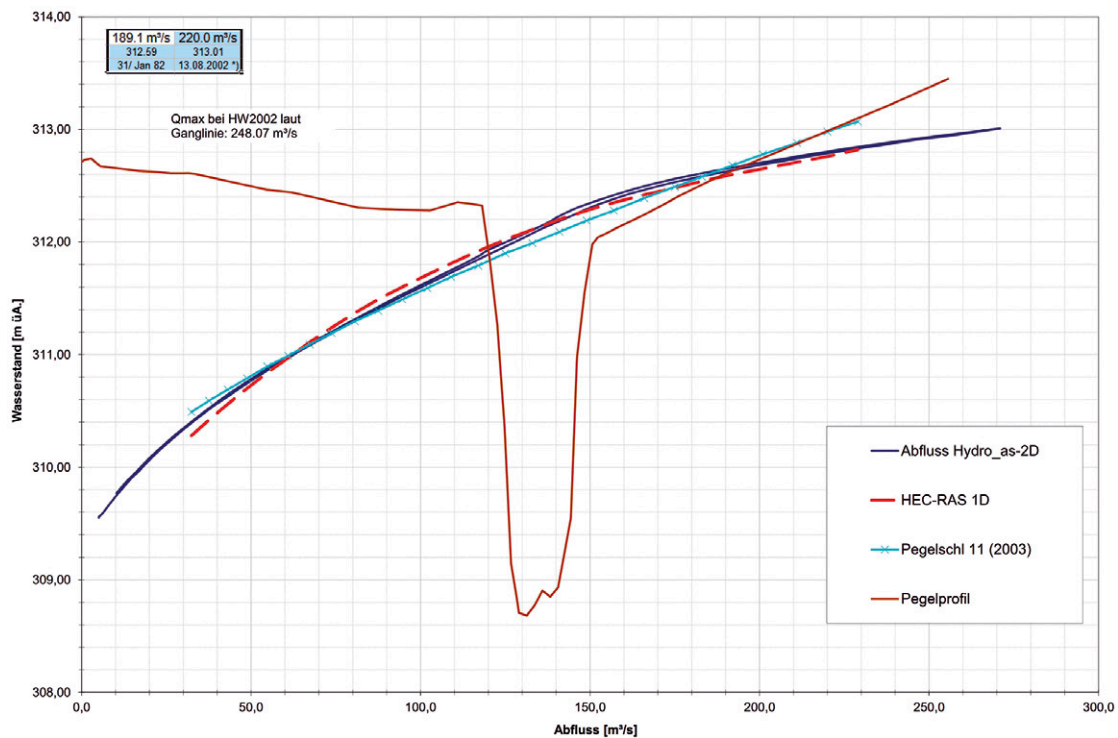


Abb. 8.52 Beispiel Pegelschlüssel Pramerdorf/Pram, Vergleich Pegelschlüssel des HD (hellblau) mit Pegelschlüssel aus dem 2D-Modell (dunkelblau) und aus einem 1D-Modell (rot) zur Überprüfung der Plausibilität der Abflussdaten. Bei den Abflüssen von 189,1 und 220 m³/s passen die Pegelschlüssel relativ gut zusammen, allerdings im Bereich des Ausufers zwischen 312,0 und 312,4 m ü. A. ist der alte Pegelschlüssel des HD ohne Knick, was nicht zutreffend ist. Mit dem 2D-Modell wurde auch die absteigende Welle berechnet, was an zwei Ästen der blauen Linie erkennbar ist: ansteigende und abfallende Welle (Hysterese)

2.3.3. Ereignisdokumentation

Das Hochwasser 2002 wurde als Kalibrierungshochwasser ausgewählt und alle verfügbaren Informationen wurden zusammengetragen, dazu zählen neben den Regen- und Abflussdaten auch Erhebungen von Wasserständen und Anschlagslinien im Vorland und die Befragung von Anrainern und Flussbaudienststellen (**Box 2.13**). Der Verlauf der Hochwasserwellen 2002 zeigt, dass die erste Welle viel breitere Scheitel aufweist als die zweite Welle. Der ansteigende Ast ist bei der zweiten Welle steiler, bei dieser ist auch ein kleines Zwischenhoch, das jedoch nicht aus der Wellenüberlagerung der einzelnen Teileinzugsgebiete stammen dürfte, sondern vom Regenverlauf herrührt. Der abfallende Ast ist in beiden Fällen sehr ähnlich.

2.3.4. Lokale und regionale Abflussstatistik

Vom HD wurden bereits umfangreiche statistische Auswertungen durchgeführt, auf die Bezug genommen werden konnte. Auch im Zuge von HORA wurden Auswertungen in Zusammenarbeit mit dem HD durchgeführt. Die folgenden Tabellen zeigen die Erwartungswerte und die Spalten aus den Erwartungswerten für HQ_{10} , HQ_{30} , HQ_{100} und HQ_{300} . Die Werte für den Pegel Diersbach wurden vom HD aufgrund der kurzen Beobachtungsdauer unter Übertragung von Informationen aus Nachbargebieten abgeschätzt.

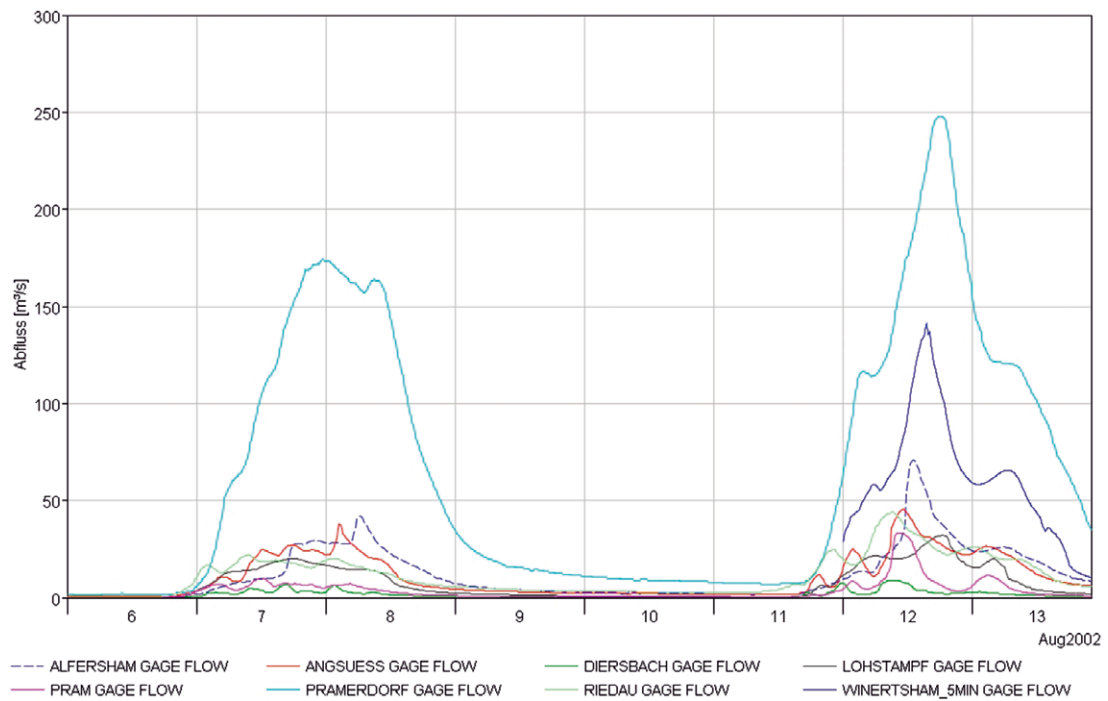


Abb. 8.53 Abflusswellen beim HW 2002 vom 6. bis 13. August für alle Pegel des Prameinzugsgebiets mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten

Tab. 8.37 Erwartungswerte der Hochwasserdurchflüsse (m^3/s), vom HD 2011 bekannt gegeben

HQ_{100} HD	E [km^2]	HQ_{10}	HQ_{30}	HQ_{100}	HQ_{300}
Pram	14,2	19,0	26,0	34,0	40,0
Riedau/Pram	60,0	34,0	42,0	51,0	59,0
Lohstampf/Messenbach	39,3	31,0	41,0	52,0	62,0
Winertsham aus SWWGK Cate	129,9	73,0	92,0	110,0	130,0
Angsüß	64,1	36,0	45,0	55,0	64,0
Alfersham	81,3	38,0	49,0	61,0	73,0
Diersbach	10,6	14,0	19,0	24,0	29,0
Pramerdorf	340,9	160,0	200,0	240,0	275,0

Tab. 8.38 Spenden aus den Erwartungswerten, vom HD 2011 bekannt gegeben

HQ_{100} -Spende HD	E [km^2]	HQ_{10}	HQ_{30}	HQ_{100}	HQ_{300}
Pram	14,2	1,338	1,831	2,394	2,817
Riedau/Pram	60,0	0,567	0,700	0,850	0,983
Lohstampf/Messenbach	39,3	0,789	1,043	1,323	1,578
Winertsham	129,9	0,562	0,708	0,847	1,001
Angsüß	64,1	0,562	0,702	0,858	0,998
Alfersham	81,3	0,467	0,603	0,750	0,898
Diersbach	10,6	1,321	1,792	2,264	2,736
Pramerdorf	340,9	0,469	0,587	0,704	0,807

Gemäß **Box 2.14** wurden als eine Auswertung die Spenden in einem Vergleich dargestellt. Die Pegel Diersbach ($10,9 \text{ km}^2$) und Winertsham ($129,9 \text{ km}^2$) fallen aus einem durchgehenden Verlauf heraus. Diersbach wurde geschätzt und hat eine sehr kurze Beobachtungsdauer. Winertsham ist rückgestaut und daher nicht so vertrauenswürdig. Auffällig ist, dass die Ausgleichsline bei den kleinen EZG-Größen viel steiler ist als ab etwa 100 km^2 Größe.

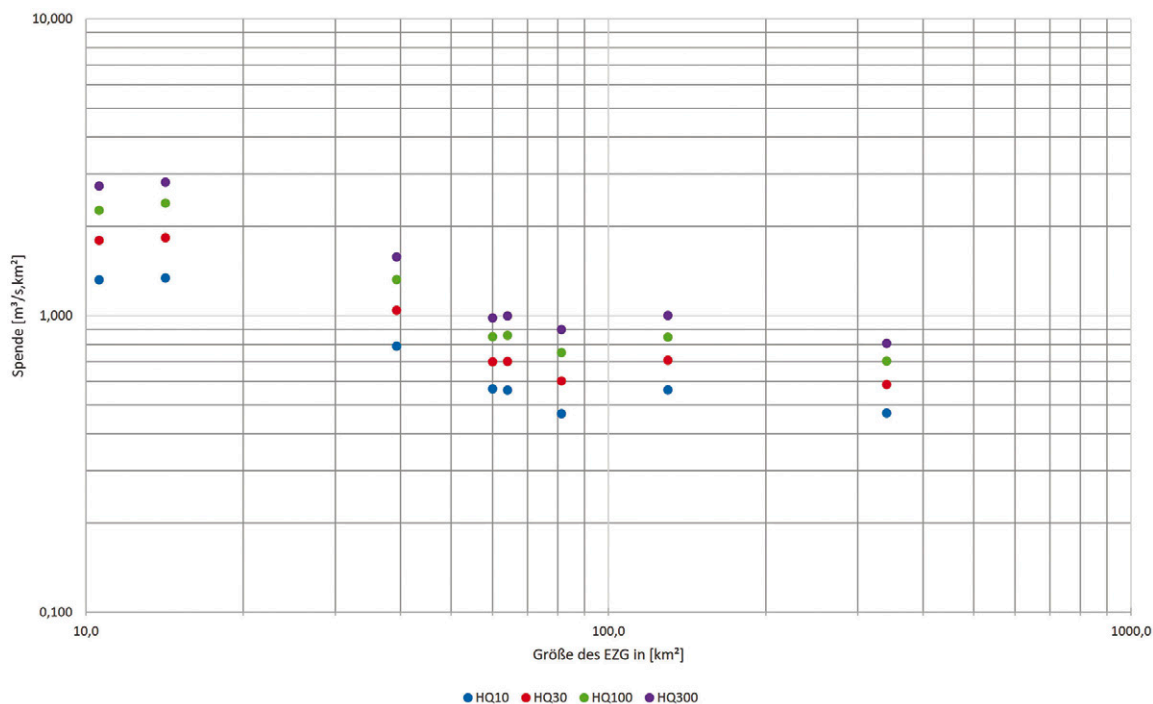
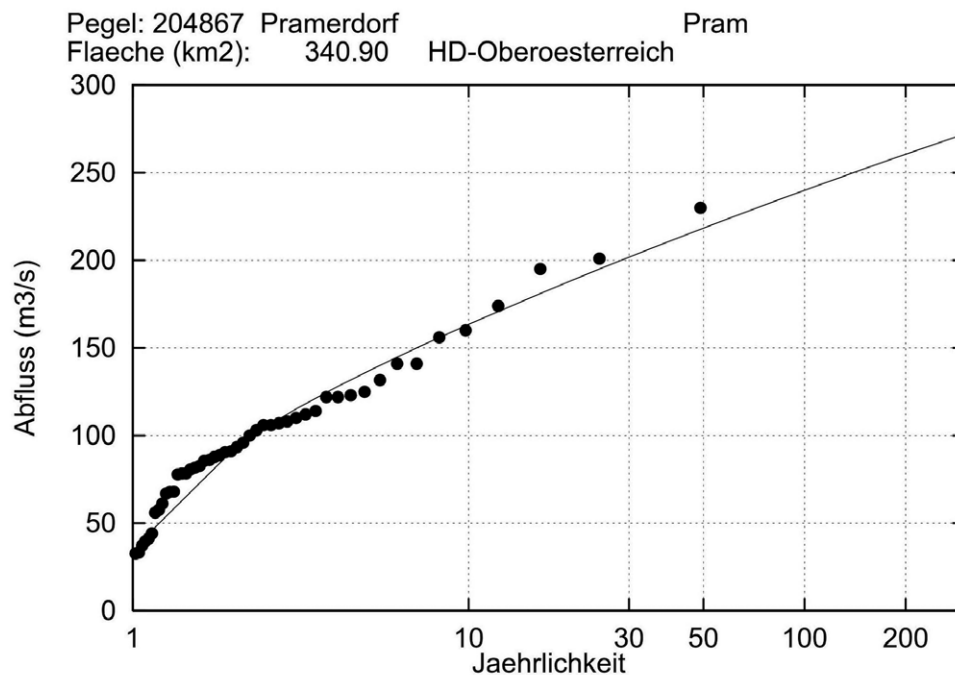


Abb. 8.54 Spendenvergleich für die Erwartungswerte der Pegel im Pram-EZG

In HORA wurden für alle Pegel Verteilungen an die Reihe der Jahreshöchsthochwässer angepasst, besonders die GEV (Generalisierte Extremwert-Verteilung) wurde im Einvernehmen mit allen Hydrografischen Landesdiensten angepasst. Für den Pegel Pram im Oberlauf werden die Verteilungen dargestellt, das Kollektiv umfasste zum Zeitpunkt der Erstellung 30 Jahre Beobachtung.



Inst. fuer Wasserbau und Ing.-hydrologie, TU Wien, 2006

Abb. 8.55 Jährliche Höchstabflüsse und angepasste GEV-Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Pegel Pramerdorf (340 km²) (Quelle: HORA)

3. Modellwahl (Modellkonzepte)

3.1. Kriterien für die Modellwahl

Wie in Kapitel 3. des Regelblatts erörtert wird, kommen für ein und dieselbe Einzugsgebietsmodellierung häufig mehrere Modelle in Frage, wobei nicht von einem am besten geeigneten Modell ausgegangen werden kann. Hingegen kommt es bei der Modellwahl auf die Zielsetzung, das Anwendungsgebiet der Modellierung, die entsprechende Datenverfügbarkeit und auch die Kenntnisse des Modellierers an (**Box 3.1**). Bei der ingenieurmäßigen Anwendung stellen die Verfügbarkeit (Kosten, Einarbeitungszeit) und die praktische Anwendbarkeit mit guter Bedienoberfläche zusätzlich ein Kriterium dar. Im konkreten Beispiel wurden vier Kriterien bewertet:

- Aufgabenstellung: Ermittlung von Bemessungsabflüssen – Hochwässer.
- Datenerfordernis/Verfügbarkeit: Datenverfügbarkeit ist gut bis sehr gut, Grey-Box- oder White-Box-Modell verwendbar.
- Prozesse: Interzeption, Oberflächenverluste, Infiltration, Interflow sind relevant, Schnee oder Gletscher sind nicht bedeutsam.
- Erfahrung: IGH hat Erfahrung mit HEC-HMS.

3.2. Modelltypen und raum-zeitliche Gliederung des Modells

Das soil moisture accounting scheme (SMA) in HEC-HMS wurde im Büro schon oftmals zur erfolgreichen Modellierung kleiner und großer Gebiete bis 400 km² eingesetzt. Neben einer praktischen Bedienoberfläche bietet es auch die Möglichkeit, wasserwirtschaftliche Bauten wie Rückhaltebecken mit deren Bauteilen gut zu modellieren. Unterschiedliche Regenverteilungen können als meteorological model gespeichert werden, verschiedene Parametersets ebenfalls, wodurch die Anwendung sehr flexibel wird und Sensitivitätsuntersuchungen einfach möglich werden. Nicht zuletzt stehen auch viele Auswertemöglichkeiten und grafische Darstellungen zur Verfügung.

3.2.1. Kausalität und Modelkomplexität

Gemäß **Box 3.2** sollen prozessbezogen möglichst physikalische Modelle (White Box) oder Konzeptmodelle (Grey Box) verwendet werden. Aus Sicht der Prozesse tritt überwiegend oberflächlicher Abfluss und seichtgründiger Zwischenabfluss auf. Diese können von HEC-HMS mit dem soil moisture accounting scheme modelliert werden. Das gewählte HEC-HMS wird als Grey-Box-Modell eingestuft.

3.2.2. Räumliche Gliederung

Halbverteilt bis verteilt (siehe auch Kapitel 3.2.):

Gemäß **Box 3.3** ist die räumliche Gliederung nach der Aufgabenstellung zu wählen. Bei verteilten Modellen sollte die Anzahl der Elemente (Teilflächen) mindestens das Zehnfache der Anzahl der Niederschlagsstationen (acht vorhanden) betragen. Die Unterteilung des EZG erfolgte in 186 Teileinzugsgebiete (mehr als das 20-Fache der Stationsanzahl), die meisten Gebiete haben eine Fläche zwischen 1 und 2 km².

Die Unterteilung erfolgte mit dem Programm HEC-GeoHMS (Preprocessing) und wurde hauptsächlich von der Topografie und dem Gewässernetz bestimmt, indem beim Zusammenfluss von Gewässern Modellknoten gesetzt wurden. Zusätzlich wurden bei hydraulisch relevanten Objekten wie Rückhaltebecken oder beim Wechsel der Gefälleverhältnisse im Gewässer oder bei Änderung der Geologie zusätzliche Unterteilungen durchgeführt. Innerhalb der Teileinzugsgebiete treten dennoch unterschiedliche Gebietseigenschaften wie Bodenart oder Durchlässigkeit auf, zur Ableitung von Parametern wurden diese flächengewichtet gemittelt.

Das Teileinzugsgebiet wird daher wie in einem Blockmodell behandelt, das ganze EZG ist als verteilt modelliert zu qualifizieren.

3.2.3. Zeitliche Gliederung

Eigentlich ist das soil moisture accounting scheme von HEC-HMS ein kontinuierliches Modell. Trotzdem konnten – mit sehr hoher zeitlicher Auflösung von 3 bis 5 Minuten und Vorgabe eines Startzustands – bisher sehr gute Modelle auch für Einzelereignisse erstellt werden und es wurde im Büro daher schon viel Erfahrung mit diesem Modell gesammelt. Zudem war angestrebt, beim HW 2002 beide im Abstand von knapp einer Woche aufgetretenen Wellen in einem Rechendurchlauf zu kalibrieren, wofür ein reines Ereignismodell ungeeignet wäre. Die Zeitschrittweite wurde entsprechend **Box 3.4** mit 5 Minuten sehr kurz gewählt, um auch bei kurzen Wellenanlaufzeiten die Dynamik richtig abbilden zu können. Intern rechnet HMS z. B. bei der iterativen Berechnung der Speicherung in Rückhaltebecken mit noch viel kleineren Zeitschritten. Da die kürzeste Regendauer mit 1 Stunde untersucht wurde, ist diese Zeitdiskretisierung erforderlich. Die Rechenzeit liegt für ein 24-Stunden-Ereignis und rund 400 km² Einzugsgebiet mit 9 Rückhaltebecken bei etwa 1 Minute. Zur Kalibrierung wurden 14 Tage des Augusthochwassers 2002 ebenfalls mit 5-Minuten-Zeitschritten gerechnet und nur eine etwas längere Rechendauer festgestellt.

3.3. Berechnungsansätze einzelner Prozesse in Niederschlag-Abflussmodellen

Das verwendete N-A-Modellprogramm HEC-HMS SMA besteht aus mehreren Modulen.

Im meteorologischen Modell wird der Regen je Teileinzugsgebiet festgelegt. Dann erfolgt die Abflussbildung mit dem SMA (Berechnung des Anteils, der zum Abfluss gelangt, für jeden Zeitschritt).

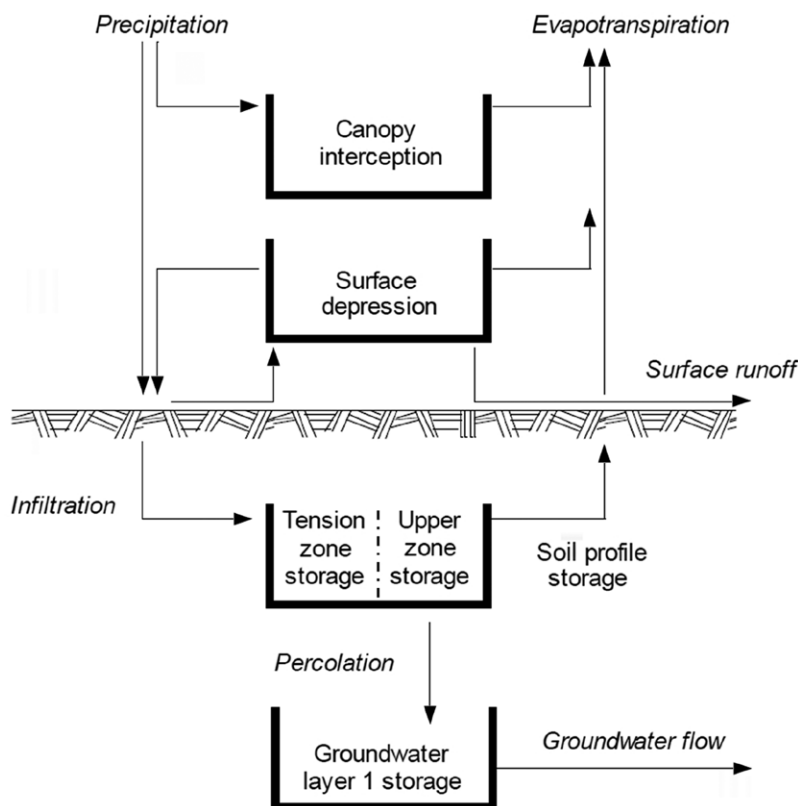


Abb. 8.56 Die verwendeten Modellbestandteile des soil moisture accounting schemes für die Abflussbildung (Quelle: Handbuch HEC-HMS)

Dieser Anteil wird in eine Welle transformiert. Der Basisabfluss wird gebildet (baseflow). Die Wellen werden an Knoten zeitrichtig addiert und in den Gewässerabschnitten weitergeleitet

(floodrouting). An den unterliegenden Knoten erfolgt wieder eine zeitrichtige Addition der Wellen. Diese Schritte werden so lange fortgesetzt, bis der Gebietsauslass erreicht wird.

3.3.1. Interzeption, Verdunstung und Schnee

Oberflächenverlust (Canopy Interception, Surface Depression): Gemäß **Box 3.6** ist es für Österreich ausreichend, die Interzeption durch andere Modellteile abzudecken. Beim Soil-Moisture-Accounting-Modell (SMA) wird der Oberflächenverlust in einen Blattspeicher und einen Oberflächenspeicher unterteilt. Bei Regenbeginn werden der Blattspeicher und dann der Oberflächenspeicher gefüllt. Wenn auch der Oberflächenspeicher gefüllt ist, geht der Regen direkt in Infiltration oder Oberflächenabfluss über. Die beiden Speicher werden durch die Verdunstung wieder geleert. Die Modellierung ist also detaillierter als in der Box gefordert.

Verdunstung: Für die Verdunstung sind dem SMA Monatswerte vorzugeben. Gemäß **Box 3.6** wurde ein einfaches Verfahren gewählt, die fertig errechneten Werte der potenziellen Verdunstung nach Penman wurden aus dem Klimaatlas entnommen. Das Modell ermittelt dann die potenzielle Verdunstung als täglichen Anteil und leert die einzelnen Speicher. Wenn der Tension-Speicher erreicht wird, wird dort die aktuelle Verdunstung durch eine Abminderung entsprechend der verbleibenden Füllung des Speichers errechnet.

3.3.2. Abflussbildung

In **Box 3.7** wird empfohlen, die physikalisch basierten Modelle (Richards-Gleichung, Green-Ampt) nur zu verwenden, wenn bodenphysikalische Informationen vor Ort vorliegen. Dies ist nicht der Fall, daher wurde ein konzeptionelles Modell entsprechend **Box 3.8** verwendet, wobei zugunsten einer detaillierteren Prozessabbildung auf die „klassischen“ SCS- oder Horton-Ansätze verzichtet wurde und der Infiltrationsansatz des SMA-Schemas verwendet wurde, der als Konzept der abflussbeitragenden Fläche eingestuft werden kann.

$$I_{pot} = I_{max} \left(1 - \frac{Ss_{cur}}{Ss_{max}} \right)$$

I_{pot} Infiltration im derzeitigen Rechenschritt [mm/h]
 I_{max} maximale Infiltrationsrate (Durchlässigkeit [mm/h])
 Ss_{cur} aktuelle Füllung des Bodenspeichers
 Ss_{max} maximale Größe des Bodenspeichers [mm]

Der Parameter Perkolation (Soil Percolation) beschreibt die maximale Perkolation aus dem Boden in den Interflow, der über die Bodenschicht Groundwater1 modelliert wird.

$$Perc_{pot} = Perc_{max} \frac{Ss_{cur}}{Ss_{max}} \left(1 - \frac{Sgw_{cur}}{Sgw_{max}} \right)$$

$Perc_{pot}$ Perkolation im derzeitigen Rechenschritt
 $Perc_{max}$ maximale Perkolationsrate (Durchlässigkeit [mm/h])
 Sgw_{cur} berechnete Bodenspeicherfüllung am Anfang des Zeitschrittes [mm]
 Sgw_{max} maximaler Bodenspeicher [mm], Gebietskennwert

3.3.3. Abflusskonzentration und Gerinnerouting

Abflusskonzentration: Die durch das Soil-Moisture-Accounting-Verfahren ermittelte Abflussfracht muss in eine Welle transformiert werden. **Box 3.10** empfiehlt dafür physikalische Modelle, es können aber auch Black-Box-Modelle verwendet werden. Für diese Transformation wurde das Clark-Unit-Hydrograph-Verfahren gewählt, welches als Linearspeicher funktioniert und die Parameter Konzentrationszeit und Speicherparameter R benötigt. Es wurde auch schon mit der Kinematischen Welle gerechnet, deren Ansatz näher an den physikalischen Grundgleichungen ist, jedoch ist die Abschätzung der charakteristischen Längen mit großem

Aufwand verbunden und erfordert auch wieder eine gewisse Kalibrierung, sodass wir dieses Verfahren praktisch nicht so gerne einsetzen.

Für die Konzentrationszeit wurde die Formel von Kirpich verwendet (Maniak 2010, Seite 312, Tabelle 6.8):

$$t_c = 0,0663L^{0,77} J^{-0,385}$$

mit t_c = Konzentrationszeit [h], L = maximale Fließweglänge [km] und J = mittleres Gefälle entlang der Fließlänge L [m/m].

Parameter R: Die Konstante R ist der Speicherparameter des Linearspeichers und kann als Quotient aus dem Abfluss q [m³/s] am Wendepunkte im abfallenden Ast der Hochwasserwelle geteilt durch die Steigung an diesem Punkt [m³/s²] abgeschätzt werden. Sie ist ein Maß für die Dauer der Welle bzw. des Speichervermögens des EZG. Da nicht für jedes Teileinzugsgebiet eine Welle zur Abschätzung nach obiger Methode zur Verfügung stand, wurde die Abschätzung nach Maniak (2010) verwendet.

Maniak (2010, Seite 317) gibt zur Abschätzung für R an:

$$R = 0,339 \cdot A^{0,62} \cdot Mq^{-0,15}$$

R [h]

A [km²]

Mq [l/s,km²]

Gerinnerouting: Für das Gerinnerouting wurden das Verfahren nach Muskingum-Cunge und Kinematische Welle eingesetzt. Letztere wurde dort verwendet, wo aus dem parallel erstellten 2D-Strömungsmodell Fließgeschwindigkeiten bekannt waren und die Modellparameter für die Kinematische Welle abgeschätzt und kalibriert werden konnten. Bei den anderen Gewässerabschnitten wurde Muskingum-Cunge verwendet, weil keine Kalibriergrößen zur Verfügung standen.

4. Wahl der Modellparameterwerte

Grundsätzlich wurde versucht, Messwerte zu verwenden, jedoch ist aufgrund der Größe des Einzugsgebiets die Verwendung flächiger Daten zur Ableitung von Parametern unverzichtbar. Die Wahl der Parameter des Modells erfolgt auf Basis von GIS-Daten in Kombination mit der Kenntnis des Gebiets und der praktischen Erfahrung aus der Anwendung in anderen Einzugsgebieten. Ziel der Parametrisierung war, es eine möglichst gute Anfangswahl zur folgenden Kalibrierung zu ermöglichen. Gemäß **Box 4.2** wurde versucht, systematische Fehler von vorneherein auszuschalten, z. B. wurden für den Parameter R im Routing die Ergebnisse der Abschätzung mit dem Faktor 10 multipliziert, weil es sich bei früheren Modellen im Zuge der Kalibrierung gezeigt hatte, dass sonst keine plausiblen Werte entstehen.

4.1. Typen von Modellparametern und ihre Messbarkeit

Dieser Abschnitt des Regelblattes erfordert keine direkte Implementierung im konkreten Projekt.

4.2. Vorgangsweise bei der Parameterwahl

4.2.1. Zusatzinformation: Hard Data und Soft Data

Das Prameinzugsgebiet ist dem Ingenieurbüro Günter Humer aus zahlreichen kleineren Projekten bekannt. Vereinzelt konnten Sickersversuche gemacht werden oder waren Aufschlüsse zugänglich, die Hinweise auf den Bodenaufbau, die Mächtigkeit und die Wasserverhältnisse im Boden gaben. Das Abfließen kleinerer und größerer Hochwässer konnten wir direkt beobachten, was Hinweise auf das Ansprechverhalten des Gebiets gibt. Zahlreiche Ausflüge und Begehungen lassen ein Mosaik von punktuellen Eindrücken („soft data“) des Gebiets entstehen, die dem fachkundigen Auge Hinweise auf die zu erwartenden Prozesse geben: so ist am Geschiebe im Bachbett zu erkennen, ob häufig Umlagerungen erfolgen oder ob an den Hängen des Gewässers Seitenerosion vorhanden ist. Vernässungsbereiche geben Hinweise auf hohen Grundwasserstand oder undurchlässige Böden, die bei der Interpretation der Angaben in der Bodenkarte helfen (**Box 4.1**). Alle diese Informationen wurden gemäß **Box 4.4** herangezogen. Bei der Erstellung von N-A-Modellen in angrenzenden Einzugsgebieten haben wir Erfahrung über die Größenordnungen der auftretenden Parameterwerte und die Zuordnung zu Bodenarten gewonnen und konnten diese in das Projektgebiet übertragen.

4.2.2. Städtische vs ländliche vs Wildbachgebiete

Das EZG ist als ländliches EZG zu typisieren, wodurch entsprechend **Box 4.2** die versiegelten Flächen und die Feststofftransportprozesse geringe Bedeutung haben.

4.2.3. Kalibrierungshierarchie und Konzept der Dominanten Prozesse (DPC)

Im Sinne der **Box 4.3** wurden als wesentliche Prozesse das Infiltrationsverhalten bei konvektiven oder großflächigen Niederschlägen und der Interflow identifiziert, wohingegen die Schneeschmelze oder der Überlauf von Speichern im Untergrund (z. B. Schutthalden im Gebirge) keinen Einfluss haben. Dementsprechend wurden die zugehörigen Parameter prioritär kalibriert. In räumlicher Hinsicht wurden zuerst die Kopfeinzugsgebiete bis zum ersten Pegel und dann die folgenden Teilflächen bis zum nächsten Pegel kalibriert.

4.3. A-priori-Parameter

4.3.1. Prozessanalyse und Prozessverständnis – Begehungen

Für die Bestimmung der A-priori-Parameter wurde die Gebietskenntnis aus einzelnen Gebietsbegehungen und -befahrungen eingesetzt (**Box 4.4**), eine flächendeckende Begehung oder Kartierung wurde aufgrund der Größe des EZG nicht durchgeführt.

4.3.2. Prozessanalyse anhand Abflussdaten und Grundwasserganglinien

Eine Abschätzung von A-priori-Daten aus Grundwasserbeobachtungen wurde nicht durchgeführt (**Box 4.5**). Anhand der Abflussganglinien bei den Pegeln wurden die Routing-Parameter der Gewässerabschnitte ermittelt.

4.3.3. Parameter aus Gebietseigenschaften

Die meisten Parameter wurden aus GIS-verfügbaren Kartierungen, z. B. der Bodenkarte (ebod), als A-priori-Werte abgeleitet und im Zuge der Kalibrierung angepasst (**Box 4.6**). Parameter aus N-A-Modellen benachbarter Einzugsgebiete wurden dazu verwendet, die Bandbreite der Werte einzugrenzen.

Oberflächenverlust (Canopy Interception, Surface Depression)

Für das N-A-Modell der Pram wurden die Anteile der Landnutzung je EZG anhand der Nutzungsart des Katasters (in der DKM) bestimmt. Den jeweiligen Nutzungsanteilen wurde ein Oberflächenverlust als Summe von Blattverlust (Interzeption) und Muldenverlust zugewiesen (siehe Tab. 8.39):

Tab. 8.39 Oberflächenverlust bestimmt in Anlehnung an Maniak (2010). Oberflächenverlust ist die Summe von Blattverlust (Interzeption) und Muldenverlust

Nutzungsart	versiegelter Anteil	Interzeption [mm] Canopy	Muldenverlust [mm] Surface	Anfangsverlust [mm]
Abbaufäche, Halde oder Deponie	90 %	0	3	3
Betriebsfläche	100 %	0	2	2
Dauerkulturanlage oder Erwerbsgarten	0 %	2	2	4
Feuchtgebiet	100 %	0	0	0
fließendes Gewässer (Wasserlauf)	100 %	0	0	0
Forststraße	90 %	0	1	1
Freizeitfläche	10 %	1	2	3
Friedhof	30 %	1	2	3
Garten	10 %	3	3	6
Gebäude	100 %	0	1	1
Gebäudenebenfläche	80 %	0	1	1
Gewässerrandfläche	0 %	0	0	0
landwirtschaftlich genutzt – Acker, Wiese oder Weide	0 %	2,5	3,5	6
Parkplatz	100 %	0	2	2
Schienenverkehrsanlage	30 %	0	4	4
stehendes Gewässer (Wasserfläche)	100 %	0	0	0
Straßenverkehrsanlage	100 %	0	1	1
vegetationsarme Fläche	0 %	2	3	5
verbuschte Fläche	0 %	4	3	7
Verkehrsrandfläche	80 %	0	2	2
Wald	0 %	4	5	9
Wald (rechtlich nicht Wald)	0 %	4	5	9
Weingarten	0 %	3	3	6
		Maniak, S. 281	Maniak, S. 283	

Der Muldenverlust bei „Acker“ wurde eher gering angesetzt, weil bei den eher schweren Böden davon ausgegangen werden muss, dass die Bodenkrupe durch den auftreffenden Regen schnell zerschlagen wird und der Boden sehr eben wird. Bei Gärten wird davon ausgegangen, dass durch Beetbegrenzungen und Hecken ein erhöhter Muldenverlust angesetzt werden kann.

Wasserleitfähigkeit – Infiltration: Für alle Verfahren zur Abflussbildung spielt die gesättigte Wasserleitfähigkeit eine wichtige Rolle. In der Bodenkarte ebod ist eine Spalte über die Wasserverhältnisse enthalten. Dort ist die Leitfähigkeit in die Kategorien „sehr gering“, „gering“, „gering mäßig“, „mäßig“, „hoch“ und „sehr hoch“ eingeteilt. Weiters sind in der Bodenkarte Bodenarten wie schluffig-toniger Lehm, Ton angegeben. Für diese existieren Tabellen für die Parameter des Green-Ampt-Verfahrens, die Anhaltswerte für die Leitfähigkeit geben (z. B. Maniak 2010, Tabelle 6.5). Aus diesen Tabellenwerten zusammen mit der Kalibrierungserfahrung früherer N-A-Modelle wurde ein Wert für die gesättigte Leitfähigkeit [mm/h] wie folgt zugeordnet (**Box 4.6**). Im Wald sind in der Bodenkarte keine Kartierungen zu finden. Für diese Gebiete wurde geprüft, welche geohydrologischen Verhältnisse vorliegen und dann die Parameterwerte angrenzender ähnlicher bekannter Böden angesetzt. Die Wälder gründen überwiegend in den pleistozänen Schottern (teilweise angewittert mit hohem Schluffanteil) oder im Sauwald auf der sandigen Verwitterungsschwarte des Granits. Den aus diesem Grundgestein entstandenen Böden wurde die Wasserleitfähigkeit „mäßig bis hoch“ zugewiesen.

Tab. 8.40 Zuordnung von gesättigten Durchlässigkeiten im Einzugsgebiet der Pram zu den Bezeichnungen in der Bodenkarte ebod. Diese Werte wurden als A-priori-Werte für das Soil-moisture-accounting-Verfahren in HEC-HMS verwendet und durch die Kalibrierung angepasst. Die Anwendung in anderen Gebieten setzt eine Kalibriermöglichkeit voraus

Wasserleitfähigkeit	Bodenart	Bandbreite (mm/h)	max Infiltration (mm/h)	Kf (10^{-6} m/s)
sehr gering	schluffig toniger Lehm, Ton	0.1 – 2	2	0,56
gering	sandig toniger Lehm	0.1 – 4	4	1,11
gering bis mäßig	toniger Lehm, sandig toniger Lehm	0.2 – 5	5	1,39
mäßig	Lehm, schluffiger Lehm	1 – 15	15	4,17
mäßig bis hoch	sandiger Lehm	2 – 30	25	6,94
hoch	lehmgiger Sand	3 – 50	50	13,9
sehr hoch	Schotter, Sand	10 – 200	200	55,6
mäßig bis hoch	unbekannt (Wald, Schotterböden, Granit)		25	6,94

Bodenspeicher: In der Spalte „Horizonte“ der Bodenkarte ist die Tiefe der einzelnen Bodenhorizonte zu finden. Die Werte sind in cm angegeben und beziehen sich auf den Abstand von der Geländeoberkante bis zum Ende des jeweiligen Horizontes. Als Bodenmächtigkeit wurde die Tiefe bis zum Beginn des C-Horizontes verwendet. Bei bekannten Schotterböden (in der Bodenkarte ist auch die Zusammensetzung der Horizonte beschrieben) wurde die Bodenmächtigkeit bis zu 200 cm erweitert, da bei diesen Böden mit einem ungesättigten Porenraum bis in größere Tiefe gerechnet werden kann. Ausgenommen davon sind natürlich die Böden, bei denen in der Horizontbeschreibung der Grundwassereinfluss angegeben war. Wenn Verglebung auftrat, wurden diese Horizonte nicht mehr eingerechnet. (**Box 4.6**)

Undurchlässige Flächen: Das N-A-Modell kann die undurchlässigen Flächen dadurch berücksichtigen, dass von diesen ein direkter Abfluss erzeugt wird, der zu der Welle vor den durchlässigen Teilflächen im jeweiligen EZG addiert wird. Die undurchlässigen Flächen wurden anhand der Nutzungskategorien der DKM ermittelt, Verkehrsflächen, Lagerflächen und Schotterabbau sowie Gebäude wurden als undurchlässig klassifiziert. Der Anteil der undurchlässigen Flächen ist kein Parameter, der in der Kalibrierung verändert wird.

Soil Percolation: Dieser Parameter beschreibt die maximale Perkolation aus dem Boden in den Interflow, der über die Bodenschicht Groundwater1 modelliert wird. Die Soil Percolation wird als Startwert zu 1/10 der Infiltration gesetzt.

Konzentrationszeit: Die Ergebnisse der Formel von Kirpich wurden mit $m = 2$ für bewachsene Böden multipliziert.

Parameter R (Speicherwert für Wellenform in Abflusstransformation)

Es wurde die Abschätzung nach Maniak (2010)

$$R = 0,339 \cdot A^{0,62} \cdot Mq^{-0,15}$$

verwendet (Seite 317). Erfahrungen aus in vorhergehenden Projekten erstellten N-A-Modellen haben gezeigt, dass die Werte für die Verwendung mit dem Clark-Verfahren in HEC-HMS etwa mit dem Faktor 5 bis 10 multipliziert werden müssen, der A-priori-Wert wird mit 8 multipliziert (**Box 4.7**). A_E ist die Fläche des EZG in [km²], die Mittelwasserspende Mq [l/s, km²] wurde aus dem Hydrografischen Jahrbuch ermittelt. Der Kalibrierung des Parameters R wurde größere Aufmerksamkeit gewidmet, weil er über den ablaufenden Ast der Hochwasserwelle gut überprüfbar ist.

Floodrouting: Zur Wahl der Parameter im Muskingum-Cunge-Verfahren wurde jedem Gewässerabschnitt ein Profil zugewiesen, das aus der Profilvermessung für den Gefahrenzonenplan gewonnen werden konnte oder anhand der Begehung geschätzt wurde. Die Rauheit der Sohle und Böschungen musste noch eingegeben werden, dies erfolgte anhand der Begehung der Gewässer für den Gefahrenzonenplan. Die Parameter der kinematischen Wellen wurden anhand der Fließgeschwindigkeit aus dem 2D-Strömungsmodell für das Kalibrierungsereignis „kalibriert“.

4.4. Parameterkalibrierung am Abfluss

4.4.1. Vorgangsweise

Die Kalibrierung konnte an den sieben Pegeln im Einzugsgebiet durchgeführt werden, für die vom Hochwasser 2002 Daten vorlagen (**Box 4.7**).

Es wurde ein Regenmodell für das HW 2002 erstellt, das alle 5 Schreiberstationen berücksichtigt. In HEC-HMS beschreibt ein Regenmodell (meteorological model), welcher Regen für jedes Teileinzugsgebiet verwendet werden soll. Auf diese Weise wird die Regionalisierung des Niederschlags im Gebiet dargestellt. In einem ersten Schritt wurde die räumliche Verteilung gemäß Thiessen-Polygonen gewählt, diese Verteilung lieferte sehr unpassende Verläufe der errechneten Abflussganglinien, die mit den beobachteten Abflüssen nicht zusammenpassten. Beispielsweise lieferten alle Gewässer aus dem Einzugsgebiet der Station Kopfing zu große Abflüsse, weil die Niederschläge in Kopfing offenbar nur sehr lokal waren. Daher wurde eine neue Zuordnung manuell erstellt, die die Verteilung der Tagessummen von zusätzlichen und außerhalb liegenden Stationen berücksichtigt. Dazu musste auch für die Station Geboltskirchen eine Regenganglinie manuell erstellt werden.

Bei der Kalibrierung wurden die anhand der Basisdaten (Bodenkarte, Landnutzung etc.) ermittelten Parameter so weit abgeändert, dass die gemessenen Ganglinien an den Pegeln möglichst gut abgebildet werden. Dabei wurde getrachtet, beide Spitzen des Jahres 2002 gut dem Scheitel und dem Verlauf nach zu treffen (entsprechend der Empfehlung in **Box 4.7**, manuelle Kalibrierung). Besonders wurde auf die Form der ablaufenden Wellen geachtet. Bei der Kalibrierung wurde von oben nach unten vorgegangen, d. h. mit den Pegeln im Oberlauf begonnen und diese dann bei der Kalibrierung des nächsten Gewässerabschnittes nicht mehr verändert. Kalibriert wurden die Anfangsverluste, Durchlässigkeit, Größe des Bodenspeichers, Perkolationsrate, R und Konzentrationszeit. Das Kalibrieren erfolgte manuell durch

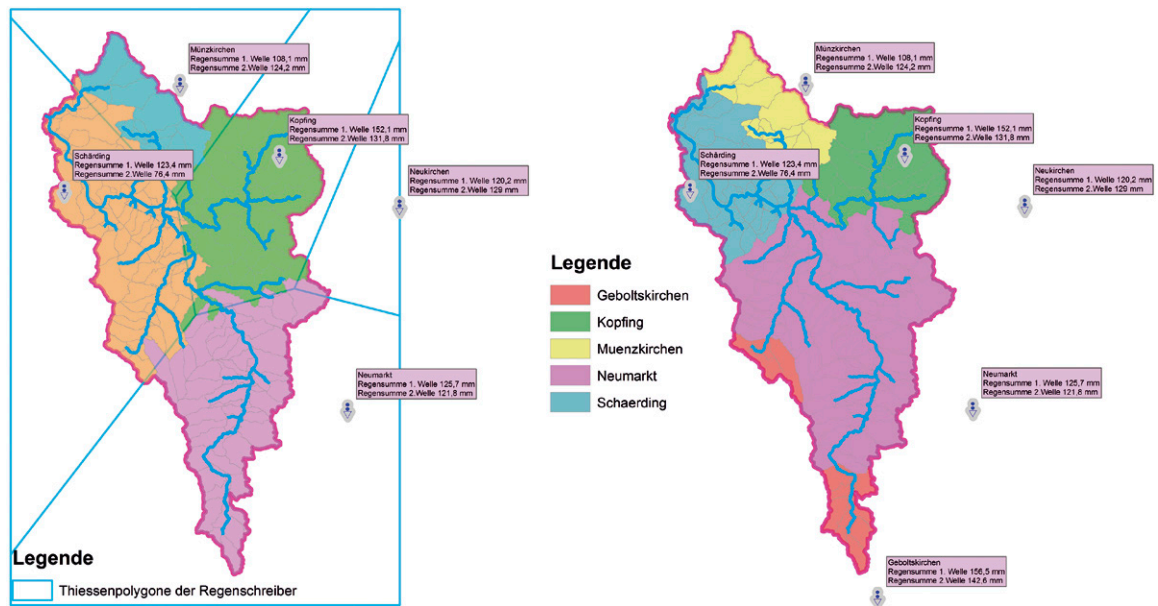


Abb. 8.57 links: Zuordnung der Teileinzugsgebiete zu Regenschreibern nach Thiessenpolygonen. Rechts: verbesserte Zuordnung der Regenstationen für das Regenmodell der Kalibrierung, Ereignissummen der Schreiberstationen des Hydrografischen Dienstes für erste und zweite Welle des HW 2002

Verändern um z. B. 10 % und Interpretieren des Ergebnisses, worauf der nächste Veränderungsschritt gesetzt wird. Innerhalb eines Kalibrierabschnittes (zwischen bereits kalibriertem Oberliegerpegel und aktuell zu kalibrierendem Pegel) werden alle Teileinzugsgebiete mit dem gleichen Prozentsatz verändert. Dadurch bleibt das Verhältnis der räumlichen Verteilung der Parametergrößen erhalten.

Alle Veränderungen, die an den A-priori-Parametern durchgeführt wurden, wurden in einer Tabelle intern protokolliert und bei wesentlichen Schritten die Änderungen in den Abflussganglinien als Abbildung und mit Analyse dazu in die Tabelle aufgenommen. Dadurch war es möglich, wenn sich eine Parameterveränderung in die falsche Richtung entwickelt hatte, den Weg zurückzufinden.

4.4.2. Beurteilung der Modellierungsgüte

Eine Beurteilung mittels Gütemaßen wurde nicht durchgeführt.

4.4.3. Manuelle Kalibrierung

Die Kalibrierung wurde manuell durchgeführt, am Pegel Alfershams (81,3 km²) sei das Ergebnis der Kalibrierung dargestellt: Die rote berechnete Hochwasserwelle bildet die erste Welle am 8. August nicht sehr gut ab, die zweite am 12. August ist besser getroffen. Der Grund liegt im Regen der Station Kopfing. Diese liegt im Sauwald ca. 150 m höher als der Großteil des Einzugsgebietes von Alfershams. Dieser Schreiber hatte eine kurze extreme Starkregenphase aufgezeichnet, die sich in Form dieser Spitze äußert. Diese Spitze wurde nicht aus dem Regenmodell entfernt, sondern als „falsches Signal“ im Modell belassen und die Auswirkung untersucht. Dass die Spitze grundsätzlich aufgetreten ist und von einer lokalen Starkregenzelle herrührt, zeigt Abb. 8.58 vom Pegel Alfershams, in dessen Einzugsgebiet der Regenschreiber Kopfing liegt. Es muss sich demnach um einen punktuellen hohen Niederschlag am 8. August handeln, der nur lokal um Kopfing aufgetreten ist. Die Regenverteilung war offenbar sehr inhomogen (entsprechend den Regensummen), diese Inhomogenität kann nur durch dichtere Regenschreiber besser abgebildet werden. Es wurde bei früheren N-A-Modellen des Erstellers auch untersucht, wieweit Regenradar-daten eine Verbesserung bringen. Leider waren die Radar-daten schlecht mit den Stations-daten korreliert und die Auflösung der Regen-mengen war bedingt durch die großen Klassenbreiten der Intensitäten zu ungenau, deswegen waren die Radar-daten nicht verwendbar.

Der ablaufende Ast ist entsprechend dem zu hohen Abfluss am 8. August auch zu steil, am 13. August ist er gut getroffen. Vor dem abgebildeten Ereignis traten Vorregen auf, sie wurden durch eine Vorfüllung des Bodenspeichers auf 40 % berücksichtigt (**Box 4.9**).

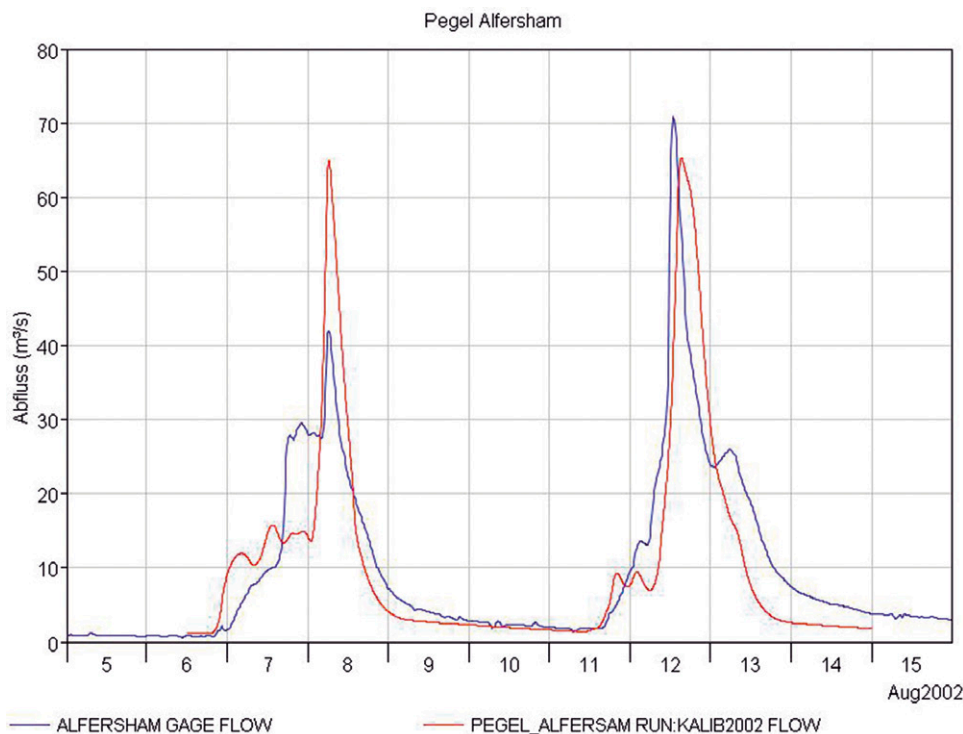


Abb. 8.58 Beobachtete Ganglinie (blau) und berechnete Welle (rot). Die berechnete Welle stimmt am 8. August nur im Auftreten der Spitze, die Größenordnung ist aber viel zu groß. Das liegt am sehr hohen Regen der Station Kopfung, der nur sehr kleinräumig gefallen ist, aber einem größeren Gebiet zugewiesen wurde

Die Retention ist im N-A-Modell im flood routing berücksichtigt, aus dem 2D-Strömungsmodell konnten Fließzeiten ermittelt werden und das flood routing auf diese Sollwerte kalibriert werden. Die Fließzeiten gelten streng genommen nur für Ereignisse derselben Größenordnung, durch die Anwendung des physikalisch basierten Verfahrens der Kinematischen Welle sind auch andere Größenordnungen richtig wiedergegeben.

Vorgehensweise: Gleichzeitig mit der Erstellung des N-A-Modells wurde auch der Gefahrenzonenplan mit einem Strömungsmodell beauftragt. Probeweise wurden die Abflüsse aus dem N-A-Modell im Strömungsmodell gerechnet. Es wurden die Zuflusswelle am Startpunkt in der Pram als auch die Wellen der Seitenzubringer in beiden Modellen zugegeben. Dabei stellte sich heraus, dass im Abschnitt zwischen der Mündung des Schwabenbachs (oberhalb Riedau) und Andorf (Pegel Winertsham) am Hauptfluss eine bedeutende zeitliche Verzögerung und eine Retention auftritt. Diese Zeitverzögerung bewirkt, dass die Vorläufer aus dem Zwischeneinzugsgebiet erst mit der ablaufenden Welle auf die Spitze des Hochwassers der Pram treffen und dadurch nicht mehr so viel zum Scheitel beitragen und eine Reduktion des Scheitels der Welle in Andorf entsteht. Gleichzeitig müssen die Retentionsräume bei anlaufender Welle gefüllt werden. Bei langdauernden Wellen spielt das eine geringere Rolle als bei kurzen Ereignisdauern.

In Abb. 8.59 sieht man die unterschiedlichen Wellenformen in Riedau vor der Schwabenbachmündung ($A_E = 55 \text{ km}^2$, magenta) und am Pegel Winertsham ($A_E = 130 \text{ km}^2$, blau). Die strichlierten Linien stellen den Wellenverlauf des unkorrigierten N-A-Modells (HMS) dar, die durchgezogenen Linien sind die Verläufe aus dem 2D-Modell, die quasi den natürlichen Ablauf der Hochwasserwelle darstellen und die vom N-A-Modell erreicht werden sollten. Man erkennt, dass beim Schwabenbach die Wellen noch ganz gut übereinstimmen, in Winertsham jedoch der Scheitel aus dem N-A-Modell zu hoch ist und zu früh auftritt. Da die Welle in der Pram selber keine Verzögerung und keine Retention erfährt, trifft sie eher auf die Spitzen der Seitenzubrin-

ger. Wenn die Welle im Hauptfluss später und gedämpft abfließt, dann trifft sie auf die ablaufenden Wellen der Seitzubringer, und die Spitze im Hauptfluss wird gemindert. Durch die Korrektur der Fließdauer wurde die Reduktion der Abflussspitze in Winertsham aber überkompensiert. Daher mussten die Parameter der Seitzubringer im N-A-Modell nachjustiert werden.

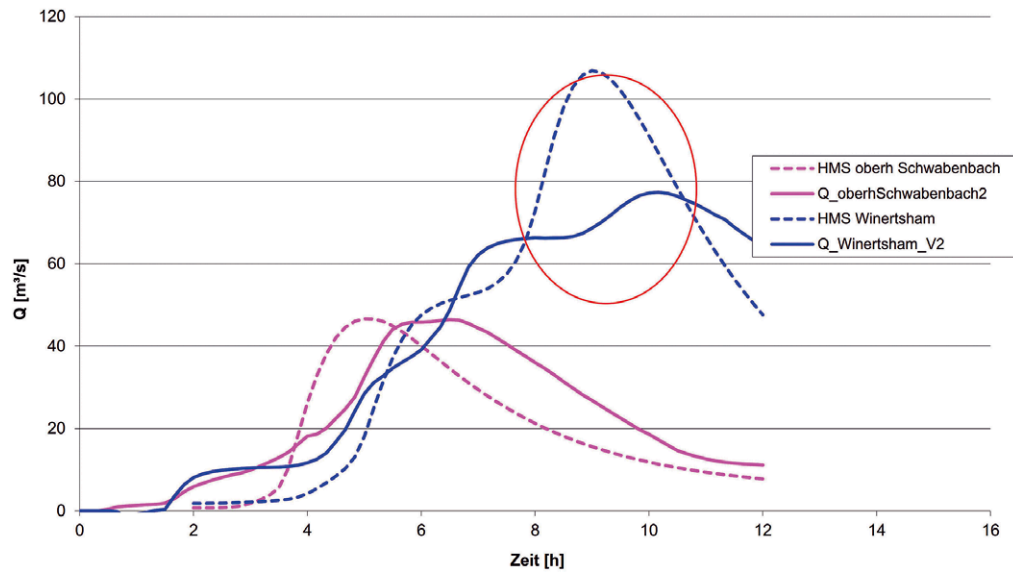


Abb. 8.59 Vergleich der Abflüsse aus dem N-A-Modell (HMS, strichlierte Linie) und 2D-Strömungsmodell (durchgezogene Linien) beim HW 2002 im Abschnitt oberhalb Schwabenbachmündung (km 37,1) bis Winertsham (km 21,7). Die Abflüsse aus dem 2D-Strömungsmodell stellen den durch das N-A-Modell zu erreichenden Bezugszustand dar

Nach einer Korrektur der Routingparameter stellt sich das Bild wie in Abb. 8.60 dar. In Riedau ist die Welle unverändert, im Oberlauf wurde auch keine Korrektur durchgeführt. In Winertsham wird die Höhe des Scheitels deutlich besser erreicht, der Verlauf der Welle ist nun im N-A-Modell auch deutlich gedehnter und der Anstieg stimmt gut mit dem hydraulischen Modell überein.

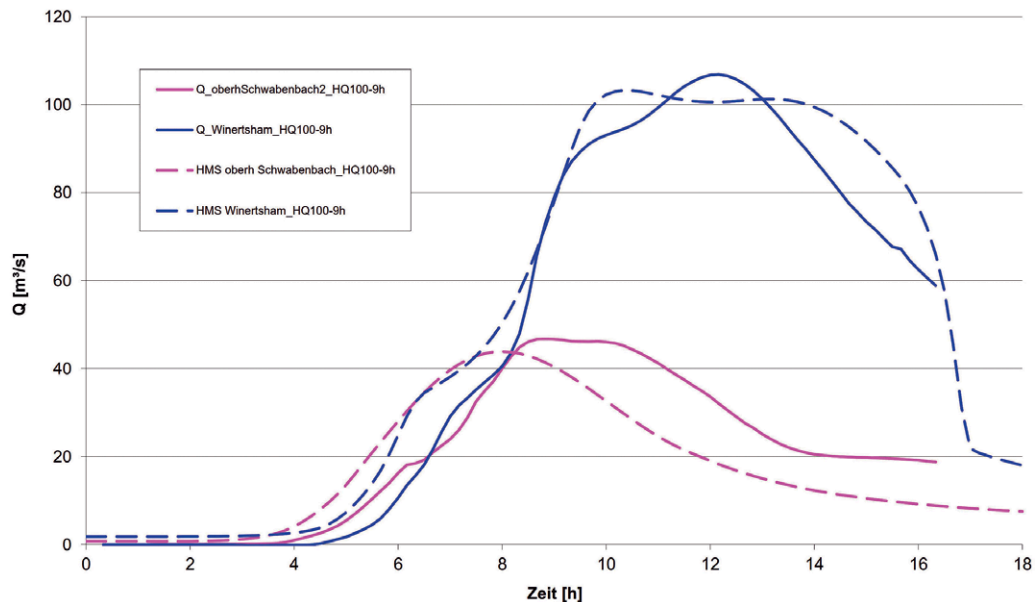


Abb. 8.60 Vergleich der Abflüsse aus dem N-A-Modell (HMS, strichlierte Linie) und 2D-Strömungsmodell (durchgezogene Linien) beim HW 2002 im Abschnitt oberhalb Schwabenbachmündung (km 37,1) bis Winertsham (km 21,7) nach Justierung der Routing-Parameter und der Gebietsparameter der Seitzubringer. Durch die längere Fließzeit im Fluss überlagern sich die Wellen der Seitzubringer so, dass die Scheitel aus N-A-Modell und Strömungsmodell gut übereinstimmen

Generell wäre es wünschenswert, das Modell an mehreren Ereignissen (große kleine Hochwässer, Sommer-Winter-Hochwasser) zu kalibrieren, da dies die Aussagefähigkeit und Belastbarkeit des Modells deutlich erhöhen würde. Diese Kalibrierung stellt jedoch einen Kostenfaktor dar, der von den Auftraggebern auch vorzusehen ist.

4.5. Parameter für Gebiete ohne Abflussdaten

Für Gebiete ohne Pegel wurden gemäß **Box 4.12** die Parameter aus benachbarten kalibrierten Gebieten übertragen. Dies erfolgte so, dass in allen Gebieten die A-priori-Parameter nach der gleichen Methodik ermittelt wurden und bei der Kalibrierung die Veränderungen an den Parametern für die Gebiete ohne Pegel gleichermaßen wie für die benachbarten beobachteten Gebiete durchgeführt wurden.

4.6. Parameter für geänderte Bedingungen

Geänderte Bedingungen wurden auftragsgemäß nicht untersucht.

5. Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung

5.1. Modellvalidierung an Abflussdaten

5.1.1. Generelle Vorgangsweise Validierung/Plausibilisierung

Für die Validierung wurde ein Hochwasser im Juli 1993 herangezogen. Damit wurde gemäß **Box 5.1** ein von der Kalibrierung unabhängiges Ereignis verwendet. Es ist zudem ein viel kleineres Hochwasser mit einer Jährlichkeit unter 10, wohingegen das Kalibrierungsereignis etwa ein hundertjährliches Ereignis war. Die Datenlage für die Validierung bei den Regenschreibern ist deutlich schlechter: Für die Kalibrierung lagen 5 Stationen vor, für die Validierung nur drei Regenschreiber in Kopfung, Münzkirchen und Neumarkt. Davon liegt Neumarkt außerhalb des EZG und die übrigen liegen nur im Norden und Nordosten des EZG.

Das Gebiet hatte im Gegensatz zum Kalibrierungsereignis August 2002 im Jahr 1993 keine Vorüberregnung, dementsprechend wurde der Prozentsatz des gefüllten Bodenspeichers von 40 % auf 15 % reduziert, ansonsten sind die Parameter des Modells gleich.

5.1.2. Schritte der Validierung

Gemäß **Box 5.2** wurden die Validierung überprüft und die Unterschiede diskutiert. Bei beiden Pegeln Winertsham und Pramerdorf sind die berechneten Abflüsse höher als die beobachteten, ausgenommen ist die Welle am 28./29. Juli. Man erkennt auch, dass zwischen den Wellen am 20. Juli und 29. Juli mehrere kleine Wellen modelliert werden, die so nicht beobachtet wurden. Der Grund für die schlechte Berechnung dürfte darin liegen, dass die Regendaten nicht repräsentativ sind. Das EZG von Winertsham erstreckt sich zu einem großen Teil in der Südhälfte des Prameinzugsgebiets, für welche kein Regenschreiber vorhanden ist. Es musste daher der Regen der Station Neumarkt verwendet werden, die im Osten etwas außerhalb des Gebiets liegt. Es regnete dort offenbar ganz anders als im Prameinzugsgebiet. Wenn man nämlich in Abb. 8.61 und Abb. 8.62 die Regen betrachtet, dann ist die Reaktion des EZG mit der berechneten Welle (strichliert) nicht unplausibel: Am 22. Juli wird eine vergleichsweise große Welle modelliert, obwohl keine beobachtet wurde, der Regen von Neumarkt war aber deutlich ausgeprägt und muss eine Welle hervorrufen. Die ablaufenden Äste werden prinzipiell gut modelliert (Winertsham 20. und 23. Juli, Pramerdorf 18. und 29. Juli), allerdings ist die Fracht am 29. Juli deutlich zu gering.

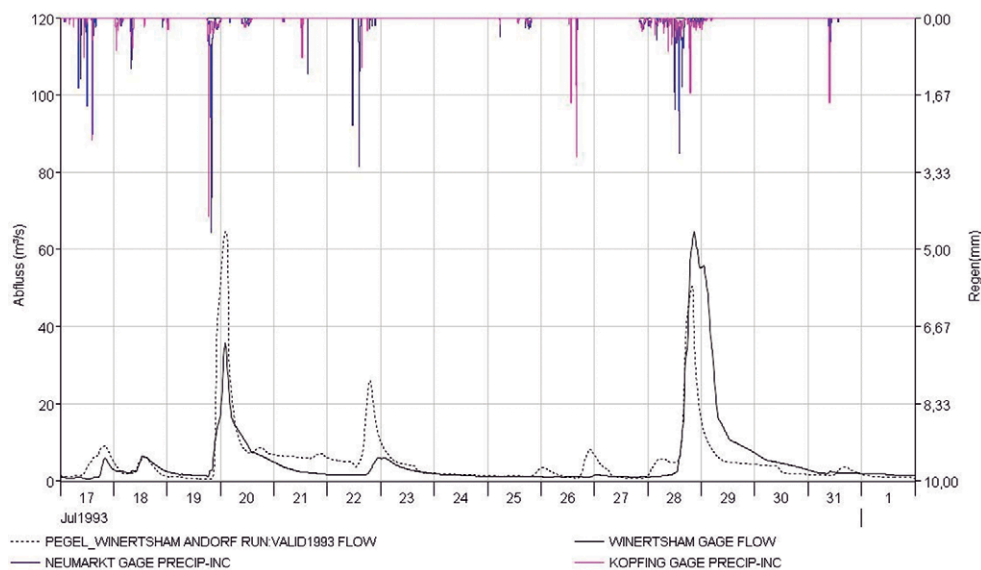


Abb. 8.61 Validierung HW 1993 am Pegel Winertsham, beobachtet: schwarz durchgezogen, berechnet: schwarz strichliert. Zu hoher Scheitel wegen unzutreffender Regenverteilung, dito für zu großes Volumen, Regen in [mm/5 Minuten]

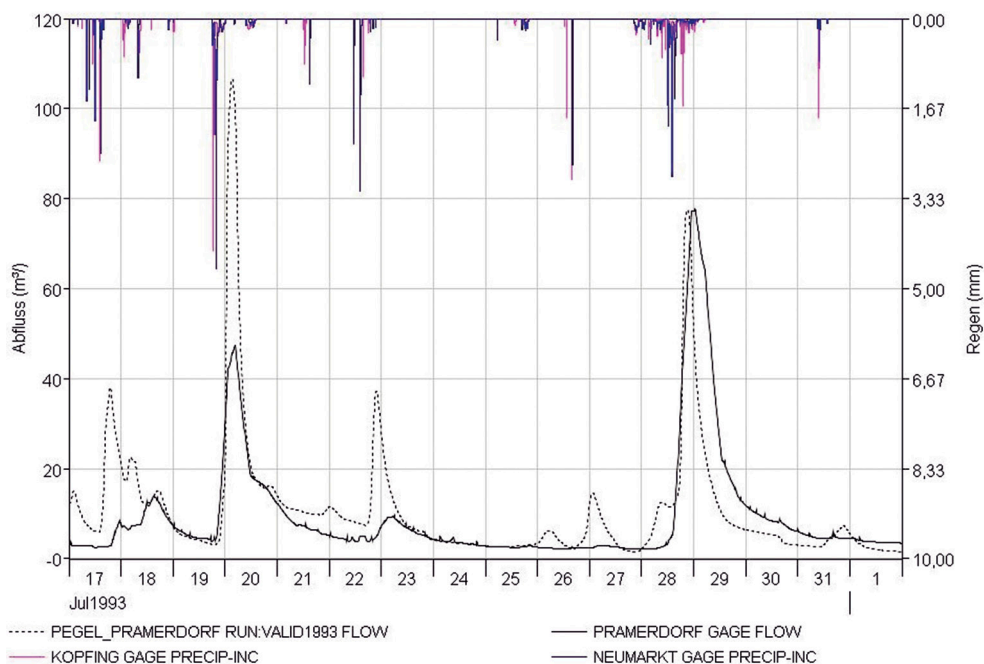


Abb. 8.62 Validierung HW 1993 am Pegel Pramerdorf, beobachtet: schwarz durchgezogen, berechnet: schwarz strichliert. Zu hoher Scheitel wegen unzutreffender Regenverteilung, dito für zu großes Volumen, Regen in [mm/5 Minuten]

5.1.3. Umgang mit schlechten Validierungsergebnissen

Die Validierung am Ereignis 1993 zeigt keine so gute Anpassung wie die Kalibrierung am Ereignis 2002, aber das Modell reagiert grundsätzlich plausibel. Das Modell funktioniert hier nicht schlechter, weil der Ereignistyp anders ist, sondern weil die Datenlage schlechter ist und es wird davon ausgegangen, dass bei guter Niederschlagsdatenlage das Modell gut funktioniert. Eine Anpassung der Modellparameter wurde daher nur insofern durchgeführt, als für das Bemessungsereignis die Vorfeuchte nicht so hoch angesetzt wird wie beim Kalibrierungsereignis HW 2002 (**Box 5.3**).

5.2. Plausibilisierung von Modellen in unbeobachteten Einzugsgebieten

Das Gebiet der Pram ist gut durch Pegel abgedeckt. Die Abflussscheitel von unbeobachteten Seitenzubringern wurden auf Plausibilität geprüft, indem deren Abflussspenden ermittelt wurden und diese in Bezug zu beobachteten Gebieten gesetzt wurden.

5.3. Spezielle Aspekte bei Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit (HQ_n)

5.3.1. Grundsätzliche Vorgangsweise

Das Ziel der N-A-Modellierung der Pram war die Ermittlung von 100-jährlichen Bemessungsabflüssen und Wellenformen für eine instationäre Berechnung des Gefahrenzonenplans.

Wir wählten die Vorgangsweise so, dass die Parameter des N-A-Modells nicht verändert wurden – es wurde also das so gut wie möglich an die Natur angepasste N-A-Modell verwendet – und die Bemessungsregen so gewählt wurden, dass ein 100-jährlicher Abfluss erzielt werden konnte.

5.3.2. Wahl der Eingangsgrößen und deren Jährlichkeit

Die Niederschlagsdauer wurde für verschiedene Dauerstufen von 2 Stunden bis 24 Stunden untersucht (siehe Kapitel 2.2.4. dieses Beispiels und **Box 5.5**). Es wurde ein 100-jährlicher Regen gemäß den eHYD-Regen gewählt (**Box 5.6**).

Im N-A-Modellprogramm wurde für jede Dauerstufe ein flächig verteiltes Regenmodell erstellt, das von den sanft und stark abgeminderten eHYD-Niederschlägen N_{bemess} ausgeht. Es wurde schrittweise vorgegangen, um die Reaktion des Einzugsgebiets bzw. des Modells zu analysieren: In einem ersten Schritt wurde auf das gesamte Einzugsgebiet ein sanft abgeminderter Regen aufgebracht. Im zweiten Schritt wurde das Modell mit stark abgemindertem Regen belastet. Nach der Interpretation wurde ein endgültiges Regenmodell als Kombination beider Ansätze erstellt.

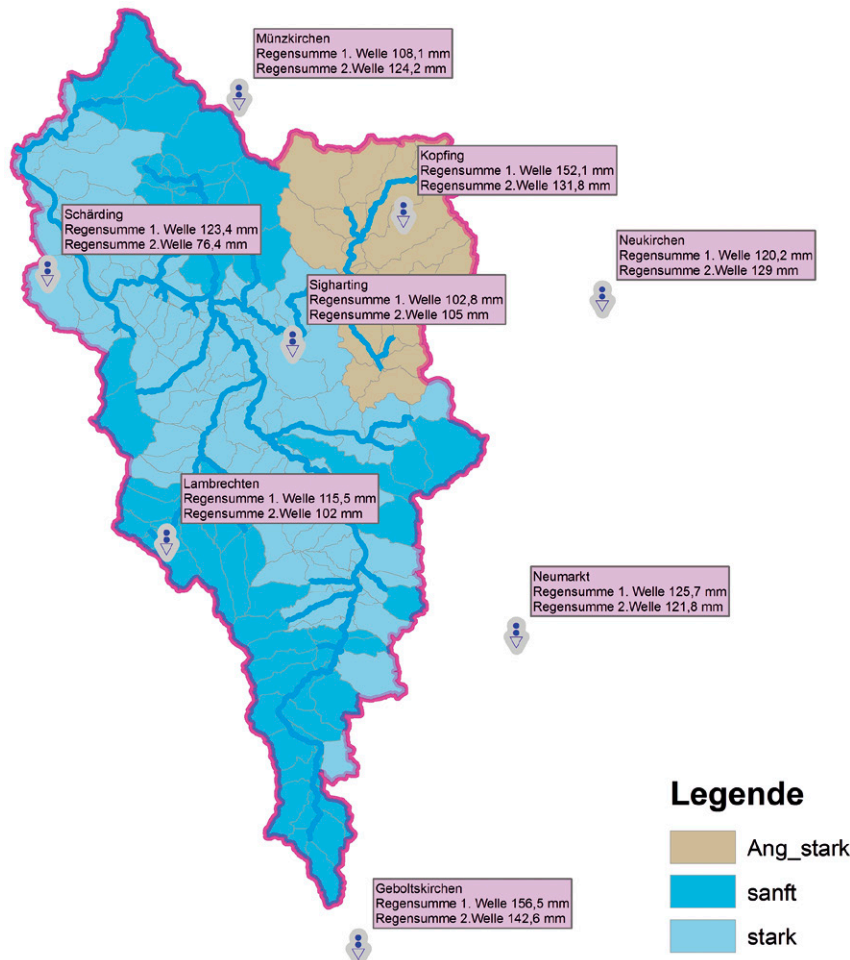


Abb. 8.63 Räumliche Verteilung der Niederschlagsabminderung für das endgültige Bemessungsmodell „b-Angsüß“ und Niederschlag des HW 2002 in den Kästchen

Es zeigte sich, dass mit den sanft abgeminderten Regen bei den Pegeln mit kleinem Einzugsgebiet die Abflüsse in der Größenordnung der Erwartungswerte der HQ -Statistik errechnet wurden. Bei größeren Einzugsgebieten sind die Abflüsse jedoch deutlich höher als die Erwartungswerte. Beim Regenmodell mit starker Abminderung trat das Gegenteil auf: In den kleinen Einzugsgebieten sind die Abflüsse zu niedrig, in den großen Gebieten und am Gebietsauslass etwas niedriger als die Erwartungswerte.

Auf diesen Erkenntnissen aufbauend wurde eine Verteilung der Bemessungsregen entsprechend der räumlichen Verteilung bei bisher abgelaufenen Ereignissen erstellt (**Box 5.6**). Die größten Regenmengen treten im Hausruck und Sauwald auf, wo viele der Kopfeinzugsgebiete liegen. Auch die einzelnen Punktniederschläge der eHYD-Gitterpunkte zeigen diese Regenverteilung. In den Oberläufen und am Rand des Prameinzugsgebiets wurden daher sanft abgeminderte Regen angesetzt, im übrigen Gebiet die stark abgeminderten Regen. Eine Detailauswertung für den Pegel Angsüß im Pfudaeinzugsgebiet (rechts oben in Abb. 8.63) zeigte, dass die Verwendung von stark abgeminderten Regen, die für das EZG des Pegels Angsüß (64,1 km²) berechnet wurden, die plausibelsten Abflüsse ergab. Die endgültige Verteilung der Regen ist in Abb. 8.63 dargestellt. Damit wurde **Box 2.7** Rechnung getragen, dass grundsätz-

lich sanft abgeminderte Regen verwendet werden sollen, in begründeten Fällen (tatsächliche Regenverteilung abgelaufener Ereignisse) aber auch andere Abminderungen gewählt werden können.

5.3.3. Wahl der HQ_n -spezifischen Modellparameter

Die Pegelstatistik im Prameinzugsgebiet beruht auf langen Reihen und wird als verlässlich angesehen. Daher kann eine Kalibrierung auf die Abflussstatistik durchgeführt werden, wobei nach 5.3.4 b) die Modellparameter aus der Kalibrierung übernommen wurden und die Bemessungsregen so gewählt wurden, dass das HQ_n möglichst gut abgebildet wird (**Box 5.7**). Dadurch wird auch ein mit der HQ_{100} -Statistik kongruenter Längenschnitt möglich (**Box 5.8**). Durch das Verwenden der kalibrierten Modellparameter wird eine Maximierung des Abflusses vermieden (**Box 5.9**).

Die an den Pegeln resultierenden Abflüsse für alle Dauerstufen sind in Tab. 8.41 zusammengestellt. Die als Bemessungsabflüsse festgelegten Werte wurden gelb hinterlegt. Man erkennt, dass die Abflüsse aus unterschiedlichen Regendauern den HQ_n nahekommen. Für die instationäre Berechnung des Gefahrenzonenplans wurde die modelltechnisch einfach verwendbare Festlegung getroffen, dass für den Hauptfluss eine Welle aus dem 9-Stunden-Regen verwendet wird. Für Seitenzubringer, für die ebenfalls ein Gefahrenzonenplan zu erstellen ist, wurde das 3-Stunden-Ereignis verwendet.

Tab. 8.41 Abflüsse unterschiedlicher Regendauer aus dem Regenmodell „b mit Angsüß“. Die gelb hinterlegten Abflüsse wurden als Bemessungsabflüsse gewählt

	HQ_{100} Erwartungswert aus Statistik	HQ_{100} inkl. Konfidenz- intervall	2h anf	3h anf	4h mitt	6h mitt	9h mitt	12h end	24h end
Pram	34,0	40	35,7	38,9	39,8	39,2	35,9	33,3	23,0
Riedau/Pram	51,0	61	48,1	54,5	49,8	51,7	51,2	54,8	45,6
Lohstampf/ Messenbach	52,0	62	50,9	57,1	52,0	52,5	50,8	52,4	41,7
Winertsham	110,0		74,4	87,7	89,6	97,4	107,2	117,8	122,2
Angsüß	55,0	64	77,5	86,4	76,6	70,3	59,1	55,8	35,0
Alfersham	61,0	71	75,0	86,9	76,1	72,0	62,0	57,7	37,6
Diersbach			22,1	22,7	17,9	16,0	14,1	16,3	12,0
Pramerdorf	240,0	260	187,1	222,8	214,5	234,2	254,0	270,8	264,3
Raab Schwimmbad			9,6	10,0	9,0	8,2	7,2	7,0	4,9
Wiesbach			17,3	19,5	18,9	19,2	18,6	20,2	15,8
Raab-Ort			2,4	3,3	2,8	2,8	2,5	2,5	1,9

Alle Modellergebnisse wurden – nach einzelnen Bächen gegliedert – in ein Spendendiagramm eingetragen (Abb. 8.64). Die Abflüsse aus 100-jährlichen sanft abgeminderten Regen (auf die ganze Gebietsgröße von 384 km²) sind mit Quadraten dargestellt. Um für unbeobachtete kleine Einzugsgebiete eine Abschätzung hoher Hochwasserabflüsse zu bekommen, wurden auch ungeminderte 100-jährliche MaxMod-Punktniederschläge auf das Modell aufgebracht (Dreiecke im Spendendiagramm, Abb. 8.64). Die Farben bei den Dreiecken und Quadraten kennzeichnen Punkte entlang eines durchgehenden Baches. Zusätzlich sind die Spenden aus den beobachteten Pegeln als Rauten eingetragen. Man erkennt, dass die MaxMod-Regen erwartungsgemäß größere Spenden erzeugen. Auffällig ist, dass die Ausgleichsgeraden entlang der Bäche sehr flache Verläufe zeigen. Das rührt daher, dass die Punktniederschläge unabhängig von der EZG-Größe mit der gleichen Intensität angesetzt wurden, in der Natur jedoch die Regenzellen begrenzte Größe aufweisen, die Überregnung daher nicht gleichmäßig ist und sich bei natürlicher Überregnung steilere Spendenverläufe zeigen würden.

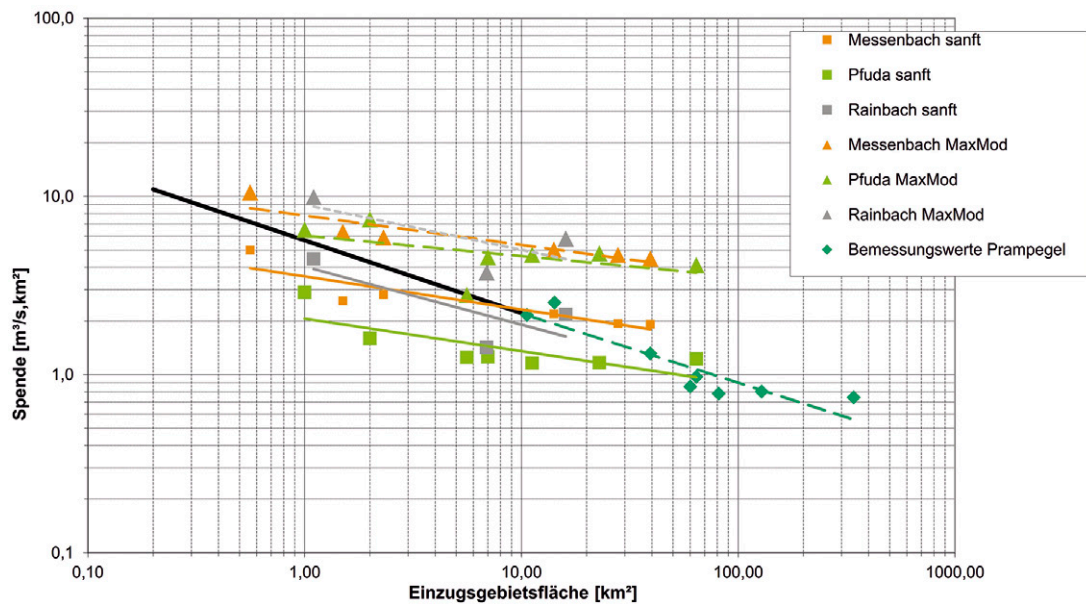


Abb. 8.64 Spendendiagramm der Abflüsse aus dem Niederschlag-Abfluss-Modell der Pram aus Überregnung mit 100-jährlichen Niederschlägen, weiters eingetragen die Spenden aus den HQ_{100} -Erwartungswerten aus der HQ -Statistik der beobachteten Pegel (Rauten). Dreiecke: mit MaxMod-ungeminderten Punktregen, Quadrate: N_{bemess} sanfte Abminderung des ganzen Pramgebiets. Die unterschiedlichen Farben stellen einzelne Bäche dar. Die schwarze durchgezogene Linie ist die als Bemessungsspendenlinie für unbeobachtete Gebiete festgelegte Linie, sie verlängert die Ausgleichsline durch die Spenden der beobachteten Pegel

Anhand dieser Ergebnisse wurde gemeinsam mit dem Auftraggeber eine Spendenlinie festgelegt, die für unbeobachtete Einzugsgebiete zur einfachen Abschätzung 100-jährlicher Abflüsse herangezogen werden kann. Dies stellt für die Sachverständigen im EZG eine Hilfe bei der einfachen Beurteilung von Vorhaben an Gewässern dar. Die schwarze durchgezogene Linie verlängert dabei die dunkelgrüne Ausgleichsline durch die Bemessungswerte (HQ_{100}) der vorhandenen Pegel. Die schwarze Linie liegt damit zwischen den Modellergebnissen von N_{Bemess} und MaxMod und tendiert bei sehr kleinen EZG zu MaxMod.

5.3.4. HQ_n -spezifische regionale Einordnung der Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Ein Spendendiagramm (Abb. 8.65) dient auch zur regionalen Einordnung der Modellergebnisse. Zusätzlich zu den in Abb. 8.64 dargestellten Pegeln im Prameinzugsgebiet (dunkelgrüne Rauten) wurden auch vier Pegel benachbarter Gebiete in rot eingetragen. Die zusätzlichen Pegel weisen vergleichsweise hohe Spenden auf, liegen aber in der Größenordnung der Abflüsse aus der Überregnung mit sanft abgeminderten N_{100} -Bemessungsregen.

5.4. Modellanwendung auf Aufgabenstellung

Gemäß der ursprünglichen Aufgabenstellung wurde das N-A-Modell zur Ermittlung von HQ_{100} -Bemessungsabflüssen für einen Gefahrenzonenplan eingesetzt. Das kalibrierte Modell wurde aber auch zur Überprüfung der Bemessung eines Rückhaltebeckens verwendet und dafür mit anderen Lastfällen beaufschlagt (**Box 8.12**).

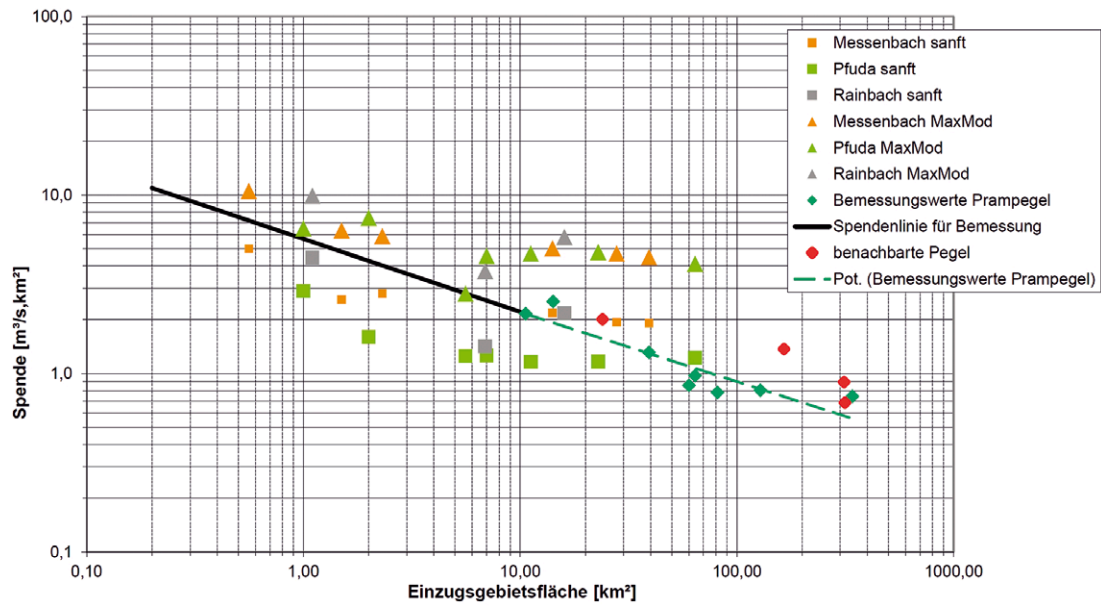


Abb. 8.65 Spendendiagramm für Bemessungsabflüsse (H_{q100}) an der Pram mit zusätzlichen Pegeln zur regionalen Einordnung der Ergebnisse (siehe **Box 5.11**), weitere Erklärung im Text

6. Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse

6.1. Beurteilung der Unsicherheiten der Ergebnisse

6.1.1. Typen von Unsicherheiten

Dieser Abschnitt des Regelblattes erfordert keine direkte Implementierung im konkreten Projekt.

6.1.2. Abschätzung der Unsicherheiten

Plausibilitätsbeurteilung: Obwohl für die Kalibrierung beobachtete Abflussganglinien zur Verfügung standen, wurden die Ergebnisse einer Plausibilitätsprüfung unterzogen (**Box 6.1**). Dazu wurden die kalibrierten Parameter mit Modellen anderer Gebiete verglichen und bei physikalischen Parametern die Einhaltung der möglichen Bandbreite geprüft. Die Parameter wurden auch mit Literaturangaben aus publizierten Modellergebnissen verglichen. Die Ganglinie von Modellgrößen wie Inhalt des Bodenspeichers oder Infiltrationsraten wurde visuell auf Plausibilität geprüft.

Für den Gefahrenzonenplan wurde parallel ein 2D-Strömungsmodell erstellt. Mit diesem konnten die resultierenden Überflutungsflächen bei den modellierten Abflüssen ermittelt werden und diese gut mit den Aussagen von Anrainern geprüft werden. Besonders in den Kopfeinzugsgebieten, wo keine Pegel vorhanden sind und lokal hohe Abflüsse auftreten können, war diese Überprüfung hilfreich.

Sensitivitätsanalyse: Im Zuge der Kalibrierung wurden auch zahlreiche Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Mit der Kalibrierungsstrategie, dass alle Schritte der Parameterveränderung protokolliert wurden, konnte die Reaktion des Modells auf Parameteränderungen sehr gut beobachtet werden. Beispielsweise wurde festgestellt, dass die Anlaufzeiten einen großen Einfluss auf die Wellenform des einzelnen Gebietes haben, auf die Gesamtwelle eines größeren Einzugsgebietes jedoch gegenüber dem Einfluss der Gewässerabschnitte nur einen sehr geringen Einfluss haben.

Hydrologische Argumentation möglicher Unsicherheiten: Die hydrologischen Unsicherheiten wurden speziell am Regen der Station Kopfing aufgezeigt (Kapitel 2.2.4.), welcher offenbar nur für ein kleines Gebiet repräsentativ ist, in Ermangelung dichter Regenstationen aber für ein größeres Gebiet angesetzt wurde.

6.2. Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

6.2.1. Bewertung und Interpretation der Ergebnisse

Box 6.2 empfiehlt, dass eine zusammenfassende Bewertung und Interpretation der Ergebnisse in Hinblick auf die Aufgabenstellung zu machen ist.

Bei der Analyse der Daten des HW 2002 zeigte sich, dass die Überregnung zwischen den Messstationen sehr inhomogen war und dass die Zuordnung der Regenstationen zu den Teileinzugsgebieten mittels Thiessenpolygon für dieses Regenereignis und Einzugsgebiet nicht optimal ist. Für die Beaufschlagung mit Bemessungsregen wurde eine Regenverteilung gewählt, die der von bereits aufgetretenen Ereignissen nachempfunden ist.

Die Modellparameter wurden am Ereignis 2002 kalibriert, was eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den beobachteten Abflüssen ergab. Ein Vergleich mit anderen N-A-Modellen des Autors und auch in der Literatur ergab, dass die kalibrierten Parameterwerte plausibel sind. Durch die parallele Erstellung eines 2D-Strömungsmodells konnten die Routingparameter im N-A-Modell wesentlich verbessert werden und sind für hohe Scheitelabflüsse als gut passend zu bewerten.

Die berechneten Abflüsse wurden mit denen aus der Hochwasserstatistik verglichen: sie liegen höher als die anhand der Hochwasserstatistik ermittelten Erwartungswerte. Das ist auch zu erwarten, wenn auf ein Modell, das an einem Ereignis seltener Auftretenswahrscheinlichkeit kalibriert wurde, Bemessungsregen mit Auftretenswahrscheinlichkeit 1/100 in einem Jahr aufgebracht werden. Durch die räumliche Verteilung der Bemessungsregen und die flächendetaillierte Gliederung des Modells sind die Abflussverhältnisse der Teileinzugsgebiete zueinander sehr gut wiedergegeben.

6.2.2. Bewertung der Qualität mittels Checkliste

Die Bewertung in Form der Checkliste wurde im Zuge der Erstellung dieses Regelblatts durchgeführt. Sie zeigt auch in der zusammenfassenden Form, dass die Qualität der Ergebnisse eine gute bis sehr gute ist und die Aufgabenstellung erfüllt werden konnte.

6.3. Berichtslegung an Auftraggeber

Es wurde gemäß **Box 6.3** ein umfangreicher Projektbericht erstellt, der das Modellkonzept, die verwendeten Parameter und die Ergebnisse beschreibt sowie eine Interpretation der Ergebnisse beinhaltet. Dem Auftraggeber wurden in Arbeitsgesprächen auch die Funktionsweise des Modells und die Bandbreite der Ergebnisse bei unterschiedlichen Randbedingungen (Parameterwahl, Wahl der Bemessungsregen) verdeutlicht. Durch praktische Rechenläufe bei den Besprechungen konnte quasi spielerisch mit dem Modell umgegangen werden. Dadurch entstand auch beim Auftraggeber ein Verständnis für das Modell und ein Bewusstsein für die Modellgrenzen. Bei diesen Besprechungen wurden die Ergebnisse auf Plausibilität geprüft, weil der Auftraggeber seine Gebietskenntnis einbringen konnte. Diese Besprechungen mündeten letztendlich in die Festlegung von Bemessungsabflüssen, die überwiegend in guter Übereinstimmung mit dem Erwartungswerten aus der Abflussstatistik liegen, teilweise auch deutlich höher. Diese sind als die schwarze Linie in Abb. 8.64 eingezeichnet und werden für die Ermittlung von Bemessungsabflüssen an unbeobachteten Punkten im Einzugsgebiet verwendet.



Checkliste zum ÖWAV Regelblatt 220 - Niederschlag-Abflussmodellierung

Dient zur Darstellung der Projektanforderungen für Auftragsvergaben vor Projektbeginn (vorher) sowie zur Darstellung der Durchführung der Modellierung und der Qualität der Ergebnisse bei Projektende (nachher).

Projekttitel:	Gefahrenzonenplan Pram
Projektziel:	Ermittlung des Bemessungsabflusses
Vorlage für:	
Projektanforderung / Vergabe (vorher): <input type="checkbox"/>	Institution / BearbeiterIn:
Projektbewertung (nachher): <input checked="" type="checkbox"/>	Ingenieurbüro Günter Humer

Mit dieser Entscheidungs- und Bewertungshilfe sollen im Sinne des Regelblattes rasch klare Vorgaben und Anforderungen an die Niederschlag-Abflussmodellierung dargestellt werden, z. B. im Zuge einer Ausschreibung oder Angebotslegung, sowie nach Abschluss der Modellierung eine zusammenfassende Gesamtbewertung erfolgen. Sie soll Transparenz schaffen, welcher Leistungsumfang erforderlich ist, und welche Qualität damit erreicht wird. Der Aufwand, der Kosten-Nutzen Faktor und die Qualität der Berechnungen sollen damit klarer kommuniziert werden.

Beachten Sie die jeweiligen einblendbaren Empfehlungen - Boxeninhalte des Regelblattes. Detailinformationen sind dem Regelblatt selbst zu entnehmen.

1. Aufgabenstellung

Die Gliederung nach Aufgabenstellung und Gebietstyp fokussiert die Ausgangslage, den Modellierungsschwerpunkt, und den Projektumfang. Sind Einzelereignisse von Interesse, der kontinuierliche Verlauf des Abflusses oder statistische Aussagen? Sind spezielle Gegebenheiten, wie z.B. Retention oder Veränderungen zu berücksichtigen? Stehen Extremwerte oder der Wasserhaushalt im Vordergrund der Berechnungen?

1. Generell	Generelle Vorgabe				
	HQ Bemessung	Wasserbewirtschaftung	Prognose	Analysen	
	Generelle Aufgabenstellung:				
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
1. Detailliert	Detaillierte Beschreibung				
		Gebirge (Wildbach)	Ländliches Gebiet	Städtisches Gebiet	<i>Empfehlung</i>
	Hochwasserbemessung – Ereignisse / HQn-Scheitelwerte:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.1
	Hochwasserbemessung – Wellenscharen und -volumen:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Hochwasserbemessung – Retentionsberechnungen:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Risikoanalyse – Gefahrenzonenplanung / Restrisiko:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Wasserbewirtschaftung – Berechn. von kont. Abflüssen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Wasserbewirtschaftung – Wasserhaushaltskomponenten:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Wasserbewirtschaftung – Spezielle Niederwasserberechnungen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Abflussprognosen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Analyse von Veränderungen – Klima, Landnutzung, ...:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Sonstiges (siehe Anmerkungen):	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Anmerkungen: <input style="width: 100%;" type="text"/>					
	HK1	HK2	HK3		
Klassifizierung nach Hydrologischen Kategorien:				1.2	
Argumentation: <input style="width: 100%;" type="text" value="Hohes Risiko, aber nicht so detailliert wie für HK3."/>					

2. Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen

Die Festlegung des Modells und die erreichbare Qualität hängen wesentlich von den verfügbaren Eingangsdaten ab, daher sollten die Daten bereits im Vorhinein erhoben oder gesichtet werden. Spiegeln sich aufwändige Daten auch in einem genaueren Modellergebnis wieder? Welche Gebietsdaten liegen vor bzw. sind erforderlich? Sind zusätzliche Erhebungen erforderlich? Welche Niederschlags- und Pegelaufzeichnungen etc. liegen im Einzugsgebiet, in der Umgebung und in der Region vor? Welche Qualität weisen die Daten auf? Sind Daten von großen Ereignissen vorhanden? Welche statistischen Hochwasserkenngößen liegen vor bzw. sind im Zuge des Projektes zu ermitteln, und wie kann eine Informationserweiterung die Qualität der Ergebnisse verbessern?

2. Generell	Generelle Vorgabe	
	Gewässer / Stelle(n):	<input style="width: 100%;" type="text" value="Pram, Längenschnitt - gesamtes Einzugsgebiet"/>
	Zubringer zu:	<input style="width: 100%;" type="text" value="Inn"/>
	Gebiet:	<input style="width: 100%;" type="text" value="Pram, Innviertel"/>

	<p>Fläche [km²]: <input style="width: 100%;" type="text" value="14 bis 384"/></p>
	<p>Daten lokal erheben Daten regional erheben</p>
	<p>Auswahl und Aufbereitung von Eingangsgrößen: <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/></p>
	<p>Daten zur Verfügung stellen/gestellt: <input style="width: 100%;" type="text" value="HD OÖ"/></p>
	<p>Datenprüfung: <input style="width: 100%;" type="text" value="HD OÖ"/></p>
2. Detailliert	<p>Detaillierte Beschreibung</p> <p>2.1 Gebietsüberblick und Gebietseigenschaften</p>
	<p>Ohne Geschiebe Geschiebe Murartiger Abfluss Murgang Empfehlung</p>
	<p>Ereignisklassifizierung nach ONR24800: <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 2.1 </p>
	<p><i>Daten und Erhebungen</i></p>
	<p>Laserscan Vermessung Andere Keine Daten (indirekt)</p>
	<p>Topographie EZG: <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>
	<p>Gewässernetz: <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>
	<p>Kanalnetz: <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>
	<p>Gerinneprofile: <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>
	<p>berücksichtigen nicht berücksichtigen keine</p>
	<p>Zu- / Ableitungen: <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/></p>
	<p>Detaillierte vorhandene Karten Feldbegehung Nachbar EZG regional Keine Daten (indirekt)</p>
	<p>Geologie: <input style="width: 100%;" type="text" value="vorhanden"/> <input type="checkbox"/> <input style="width: 100%;" type="text"/> <input type="checkbox"/></p>
	<p>Boden: <input style="width: 100%;" type="text" value="vorhanden"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input style="width: 100%;" type="text"/> <input type="checkbox"/></p>
	<p>Vegetation / Landnutzung: <input style="width: 100%;" type="text" value="vorhanden"/> <input type="checkbox"/> <input style="width: 100%;" type="text"/> <input type="checkbox"/></p>
<p>Geländeanleitung (Geländebegehung) Regionalisierung Abflussbeiwerte aus der Literatur Andere</p>	
<p>Abflussbeiwerte: <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input style="width: 100%;" type="text" value="Ereignisauswertungen"/></p>	
<p>Anmerkungen: <input style="width: 100%;" type="text"/></p>	
<p>2.2 Niederschlag und andere meteorologische Messgrößen</p>	
<p>Messdaten im EZG Abschätzdaten im EZG Messdaten Nachbar EZG Regional</p>	
<p>Niederschlags (Tagessummen): <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	
<p>Niederschlag (hochaufgelöst): <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	
<p>Schnee: <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	
<p>Temperatur (Tages/hochaufgelöst): <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	
<p>2.3 </p>	

Strahlung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Verdunstung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Maßgebende Messstationen:	Geboltskirch., Münzkirchen, Lambrechten, Sigharting, Neukirch., Neumarkt				
	Detailliert geprüft	Grob geprüft	Plausibilisiert	Keine	Empfehlung
Prüfung Niederschlag:	<input type="checkbox"/>	IBH	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.4
	MaxMod Niederschlag	Gewicht. Bem.-niederschlag	ÖKOSTRA Stationsstatistik		
Niederschlagshöhe: eHyd	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		2.5
	Niederschlag Statistik	Anpassung an HQn	Monte Carlo generierter N.		
Niederschlagshöhe: Andere	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
	Aus beob. Ereignissen	End- / Anfangs- / Mittenbetont	Doppelereignis	Block	
Zeitl. Niederschlagsverteilung:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.6
	Sanft	Sanft modifiziert	Stark	Keine	
Flächenabminderung N.:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.7
	Aus beob. Ereignissen	Detailliert verteilt	Einfach verteilt	Keine / räuml. konstant	
Räumliches Muster, Gebietsn.:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.8
	Stationsdaten	Fernerkundung	Höhenabhängigkeit		
Räumliche Interpolation Schnee, Lufttemperatur, Verdunstung:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		2.9
Niederschlagsprognosen, Klimawandel:	keine				2.10
Anmerkungen:	<input type="text"/>				
2.3 Abfluss					
	Messdaten im EZG	Abschätzdaten im EZG	Messdaten Nachbar EZG	Regional	
Abflussscheitel v. Ereign.:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.11
Abflussgangl. von Ereignissen:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Langzeit Abflussganglinien:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
(nur) Wasserstand:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Historische Ereignisse / Stumme Zeugen:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Maßgebende Messstationen / Ereignisstellen:	Pegel Pram, Riedau, Winertsham, Pramerdorf, Lohstampf, Diersbach				

Checkliste zum ÖWAV Regelblatt 220 - Niederschlag-Abflussmodellierung

	Detailliert geprüft	Grob geprüft	Korrigiert	Plausibilisiert	Empfehlung
Prüfung und Korrektur Abfluss:	<input type="text" value="IBH"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	2.12
Ereignisdokumentation:	<input type="text" value="HW 2002, abgelaufene Wellen untersucht"/>				2.13
	Durchführen	Übernehmen von	Infoerweiterung	HORA	
Hochwasserabflussstatistik:	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="HD OÖ"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.14
	Konfidenzintervalle		Regionale Schwankungsbereiche		
Statistische Unsicherheiten ermitteln / angeben:	<input type="text" value="HD OÖ"/>		<input type="text"/>		
	Über Pegelstatistik absichern	Retentionseffekte berechnen	Über Jährlichkeit der Zubringer plausibilisieren	Einfache Hqn-Interpolation (Spende)	
Hqn-Längenschnitt / Retentionseffekte:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Anmerkungen:	<input type="text"/>				

Bewertung

Argumentation:

Einstufung Qualität Eingangsdaten:

Geschätzter Aufwand:

Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung
Eingangsdaten	sehr gering	Keine hydrometeorologischen Daten verfügbar.
	gering	Hydrometeorologische Daten in Nachbargebieten für die Plausibilisierung verfügbar. Bei kleinen Gebieten werden Gebietskenngrößen ohne Feldbegehungen auf Basis benachbarter Gebiete oder regionaler Karten einfach bestimmt.
	mittel	Hydrometeorologische Daten im Einzugsgebiet verfügbar, deren Qualität geprüft wurde. Für Hochwasserfragen sind lokale Reihen mit mittleren Hochwässern sowie regional übertragbare Informationen verfügbar, zudem Niederschlagshöhen und Hochwassermarken. Gebietskenngrößen aus Bodenkarten etc. mit stichprobenartiger Überprüfung durch Feldbegehungen in kleinen Gebieten.
	hoch	Langjährige hydrometeorologische Daten an repräsentativen Stellen im Einzugsgebiet, mit zeitlicher Auflösung entsprechend der Prozessdynamik verfügbar. Umfangreiche Messdatenprüfung und Pegelschlüsselprüfungen. Für Hochwasserfragen sind lange lokale Reihen mit großen Hochwässern sowie regional übertragbare Informationen verfügbar. Detaillierte Gebietskenngrößen, bei kleinen Gebieten aus Feldbegehungen. In städtischen Gebieten detaillierte befestigte Flächen und Kanalsystem. Topographie und Abflussraum aus Vermessungsdaten oder Laserscan.

3. Modellwahl (Modellkonzepte)

Grundsätzlich sind die Modellwahl und Struktur nach folgenden Kriterien festzulegen: Wird die Aufgabenstellung mit dem Modell erfüllt? Entspricht die Datenlage den Modellanforderungen und werden die relevanten Prozesse mit dem Modell erfasst? Wie gut ist die praktische Erfahrung des Modellierers (Referenzen) und ist der Aufwand aufgrund der Datenlage/Kriterien gerechtfertigt? Erforderlichenfalls sollten auch verschiedene Varianten überlegt und bewertet werden.

3. Generell	Generelle Vorgabe					
	Modellwahl:	Ereignisbasiert <input checked="" type="checkbox"/>		Kontinuierlich <input type="checkbox"/>		
3. Detailliert	Detaillierte Beschreibung					
	3.1 Kriterien für die Modellwahl					
	Gewähltes NA-Modell:	HEC-HMS mit soil moisture accounting Verf., auch kontinuierl. möglich				Empfehlung 3.1
	Gew. Modell – Kriterien Check:	Aufgabenstellung <input checked="" type="checkbox"/>	Datenerford. und -verfügbarkeit <input checked="" type="checkbox"/>	Relevante hydrol. Prozesse <input checked="" type="checkbox"/>	Praktische Erfahrung m. Modell <input checked="" type="checkbox"/>	
	3.2 Modelltypen und Gliederung					
	Kausalität des Modells:	White-Box <input checked="" type="checkbox"/>	Grey-Box <input checked="" type="checkbox"/>	Black-Box <input type="checkbox"/>		3.2
	Flächengliederung des EZG:	Raster <input type="checkbox"/>	Teileinzugsgebiete <input checked="" type="checkbox"/>	Halbverteilt (HRUs) <input type="checkbox"/>	Block <input type="checkbox"/>	3.3
	Anzahl der Teilflächen / Auflösung:		180			
	Zeitliche Gliederung:	Kontinuierlich <input checked="" type="checkbox"/>	Ereignis-basiert <input type="checkbox"/>	Zeitliche Aufl. <input type="text" value="5 Minuten"/>		3.4
	Nachführungsalgorithmen (Prognosemodelle):	Erforderlich <input type="checkbox"/>		Nicht erforderlich <input checked="" type="checkbox"/>		3.5
	3.3 Berechnungsansätze					
	Ansatz – Interzeption:	Speicher für Blatt- und Bodenfläche				3.6
	Ansatz – Verdunstung:	Monatsmittel				
Ansatz – Schnee:	keiner					
Abflussbeiwerte / Verlustraten:	Physikalisch <input type="checkbox"/>	Konzeptionell <input checked="" type="checkbox"/>	Vereinfacht <input type="checkbox"/>	Indirekt / keine <input type="checkbox"/>	3.7	
Ansatz – Abflussbeiwerte / Verlustraten:	Soil moisture accounting				3.8	
Ansatz – Abflusskonzentration:	Clark UH				3.9	

Checkliste zum ÖWAV Regelblatt 220 - Niederschlag-Abflussmodellierung

				Empfehlung
	Hydraulisch (1D, 2D)	Hydrol.- detailliert	Hydrol.-einfach / lumped	keine
Fließstrecken zwischen Knoten:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Retentionsbecken:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anmerkungen:				3.10
Bewertung				
Argumentation:				
180 Teil EZG anhand Laserscan untergliedert; Gerinne einfaches Routing, Parameter aus 2D Modell gewonnen.				
Einstufung Qualität Modellstruktur: <input type="text" value="mittel / hoch"/>				
Geschätzter Aufwand: <input type="text" value="mittel / hoch"/>				
Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung		
Modellstruktur	sehr gering	Keine NA Modellierung im eigentlichen Sinn, Verwendung von Faustformeln und vereinfachten NA Beziehungen		
	gering	Konzeptionelle Beschreibung der wichtigsten Prozesse stark vereinfacht und räumlich aggregiert		
	mittel	Alle relevanten Prozesse sind im Modell zumindest konzeptionell abgebildet. Die zeitliche und räumliche Auflösung ist zur Beschreibung der Prozesse ausreichend. Gewisse Kompromisse bei Modellstruktur zur Vereinfachung		
	hoch	Modellstruktur für Aufgabenstellung ideal geeignet. Die Berechnungsansätze des Modells entsprechen den maßgebenden NA Prozessen im EG, und dies wird begründet. Alle Prozesse in ausreichender zeitlicher und räumlicher Auflösung abgebildet. Anm: Es ist nicht sinnvoll ein detailliertes NA Modell zu betreiben wenn die Datenlage dies nicht unterstützt!		

4. Wahl der Modellparameterwerte

Mit der Kalibrierung des NA Modells soll gewährleistet werden, dass die hydrologischen Prozesse der Natur (Abflussbildung, Abflusskonzentration, Routing, Retention, ...) im Modell richtig abgebildet werden. Bilden die vorhandenen Daten/Ereignisse eine gute Kalibrierbasis entsprechend der Aufgabenstellung? Sind Übertragungen aus regionalen NA-Analysen/Ereignissen erforderlich? Welche Prozesse/Parameter haben einen maßgebenden Einfluss auf die Ergebnisse und sind daher prioritär zu betrachten? Verbessert eine Feldbegehung die Qualität des Modells und die Ergebnisse? Sind die Parameter für Gebiete ohne Abflussmessungen bzw. geänderte Bedingungen zutreffend?

4. Generell	Generelle Vorgabe			
	A priori	Kalibrierung am Abfluss	Regionale Übertragung	
	Modellparameter: <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4. Detailliert	Detaillierte Beschreibung			
	4.2 Vorgangsweise bei der Parameterwahl			
	Verwendung Zusatzinformation	Abstimmung auf EZG-Typ	DPC Konzept (Dominante Prozesse)	
	Vorgangsweise: <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.1 4.2 4.3

4.3 A priori Parameter

	Detaillierte Feldbegehung	Teilbegehung	Abflussdaten	Empfehlung
Prozessanalysen:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.4
	Feldbegehung	Gebietseigenschaften	Regional	4.5
Apriori Parameter:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.6

4.4 Parameterkalibrierung am Abfluss

Keine Kalibrierung:	<input type="checkbox"/>	EZG / Pegel	4.7
Lokal, direkt im EZG:	<input checked="" type="checkbox"/>	8 Pegel im EZG, ein HQ100 zum Kalibrieren	
Regional, an ähnliche Nachbar EZGe (Anzahl)	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	

	klein	mittel	groß
HQ-Ereignisgrößen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Länge kont. Abflusszeitreihen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Erzielte Anpassungsgüte an den Abfluss

	gering	mittel	groß	
Jahresabfluss:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.8
Abflussscheitel:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Ganglinien:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

	manuell	automatisch	Reduktion Überparametrisierung	
Kalibrierung:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.9
				4.10
				4.11

4.5 Parameter für Gebiete ohne Abflussdaten

	Reg. Kalibrierung	Reg. Parameter aus externen Analysen	Feldanleitung a priori	Karten; Studien; a priori	
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.12

	Darstellen	Nicht darstellen
Detaillierte Bewertung der Übertragung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.6 Parameter für geänderte Bedingungen

	Berücksichtigen	Nicht berücksichtigen	
Landnutzung:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.13
Klimaänderung:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.14

Anmerkungen:

Bewertung

Argumentation:

Einstufung Qualität Parameterwahl:







Geschätzter Aufwand:

Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung
Parameterwahl	sehr gering	Keine gemessenen Abflussdaten im Gebiet, keine Feldbegehung, Literaturwerte für Parameter
	gering	Keine gemessenen Abflussdaten im Gebiet. Parameterwahl aufgrund von Feldbegehung und Erfahrungswerten. Oder: regionalisierte Parameter aus Pegeln mit geringer/mittlerer Übertragbarkeit
	mittel	Mehrere gemessene Abflussereignisse mittlerer Größe bzw. mehrere Jahre Abflussdaten bei kontinuierlichen Modellen. Oder: regional ermittelte Parameter von mehreren Pegeln mit sehr guter Übertragbarkeit. Oder bei Kleinstzugsgebieten: detaillierte Feldmessungen (z.B. Beregnung). In allen Fällen Feldbegehungen
	hoch	Kalibrierung an mehreren gemessenen großen Abflussereignissen bzw. bei kontinuierlichen Modellen an langen gemessenen Abflusszeitreihen. Alle für die Aufgabenstellung zu erwartenden Charakteristiken der Ereignisse sind im Modellierungsdatensatz enthalten. Zusätzlich gute Modellanpassung erzielt.

5. Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung

Mit der Validierung wird überprüft, ob dem Modell auch in der Anwendungssituation vertraut werden kann. Wurde eine Validierung mit von der Kalibrierung unabhängige Abflussdaten durchgeführt? Wie ist die Simulationsgüte für den Validierungsdatensatz? Wie sind die Ergebnisse der Modellplausibilisierung für unbeobachtete EGe? Wurden, für den Fall von Hochwassersimulationen, HQn spezifische Modellparameter gewählt? Wurden das NA-Modell und die Hochwasserstatistik in Abhängigkeit der vorhandenen Datenqualität aufeinander abgestimmt? Sind die Ergebnisse der regionalen Einordnung plausibel und interpretierbar?

5. Generell	Generelle Vorgabe	
	NA-Modell: <input checked="" type="checkbox"/> Validierung <input type="checkbox"/> Plausibilisierung	HQn-spezifische Aspekte: <input type="checkbox"/> HQn-Kalibrierung <input type="checkbox"/> HQn Informationserweiterung
5. Detailliert	Detaillierte Beschreibung	
	5.1 Modellvalidierung an Abflussdaten (Zeitraum der nicht Teil der Kalibrierung ist)	
	Validierung: <input checked="" type="checkbox"/> Durchführen <input type="checkbox"/> Nicht durchführen	Empfehlung: 5.1
	Validierungszeitraum: <input type="text" value="HW 1993"/>	Anzahl der Ereignisse: <input type="text" value="1"/>
	Ereignisse unterschiedlicher Größe: <input checked="" type="checkbox"/>	Empfehlung: 5.2

	Gütemaße Bias	Einfache, optische Bewertung	Bewertung Qs, V Einzelereignisse	
Güteprüfung der Validierung:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<i>Erzielte Validierungsgüte des Abflusses</i>				
	gering	mittel	Groß	
Jahresabfluss:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Abflussscheitel:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ganglinien:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Umgang mit schlechten Validierungsergebnissen:	Unterschiedliche Randbedingungen, schlechtere Datenlage bei Regendaten.			Empfehlung 5.3 
Anmerkungen:	<input type="text"/>			
5.2 Plausibilisierung von Modellen in unbeobachteten Einzugsgebieten				
	Sättigungsfl.	Erosionsspuren	Schnee	HW-Marken
Ländliche Gebiete:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Ereignis-Chronik	Stumme Zeugen	Dendromorphol. Hinweise	
Wildbach-Gebiete:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	ÖWAV-Regelblatt 11,19	Beobachtungen / Überläufe	Vergleich mit anderen Netzen	
Städtische Einzugsgebiete:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Anmerkungen:	3 h, 9 h gewählt in Absprache mit AG, weil modellierte Scheitel gut.			
5.3 Spezielle Aspekte bei Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeiten (HQn)				
Relevante Niederschlagsdauerstufen [h]:	<input type="text"/>			5.5 
	Gleich der Abflussjährlichkeit	Anpassung an HQ-Statistik	Andere	
Jährlichkeit des Bemessungsniederschlags:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Vorgangsweise bei HQn-spez. Modellparametern:	<input type="text"/>			5.7 
	gut	mittel	schlecht, keine	Regionale Informationserweiterung
Qualität / Datenlage HQ-Statistik:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Qualität / Datenlage NA-Ereignisse:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	HQn-Kalibrierung	Ereignis Kalibrierung	A priori Parameter	
Gewählte Methodik:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
			5.8 	
			5.9 	
			5.10 	

Checkliste zum ÖWAV Regelblatt 220 - Niederschlag-Abflussmodellierung

	Spenden Hq	Hq / VD-Direktabfluss-volumen / EZG-Darstellung	<i>Empfehlung</i>
HQn spezifische regionale Einordnung:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	5.11
Anmerkungen: <input style="width: 100%;" type="text"/>			
5.4 Modellanwendung			
	Durchführen	Nicht durchführen	
Begründung der Lastfälle / Szenarien:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5.12
Anmerkungen: <input style="width: 100%;" type="text"/>			
Bewertung			
Argumentation: <input style="width: 100%;" type="text"/>			
Einstufung Qualität Validierung / Modell-Plausibilisierung: <input style="width: 100%;" type="text" value="mittel / hoch"/>			
Geschätzter Aufwand: <input style="width: 100%;" type="text" value="hoch"/>			
Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung	
Validierung und Modell-Plausibilisierung	sehr gering	Keine Validierung, vage Plausibilitätsindikatoren. HQn spezifisch: a priori Kalibrierung ohne regionale Informationserweiterung	
	gering	Keine Validierung, nur Plausibilisierung, gute Plausibilitätsindikatoren (z.B. stumme Zeugen; unabhängige regionale Vergleiche) HQn spezifisch: a priori Kalibrierung mit regionaler Informationserweiterung (HQ Statistik oder HQn spez. Parameter)	
	mittel	Validierung an beobachteten Abflussganglinien für unabhängigen Zeitraum oder Einzelereignisse im Gebiet und angemessene Modellgüte bei der Validierung. Oder: Hohe Validierungsqualität an einem nahen Unterlieger- oder Oberliegerpegel. HQn spezifisch: Ereignis Kalibrierung mit regionaler Informationserweiterung (HQ Statistik oder HQn spez. Parameter)	
	hoch	Validierung an beobachteten Abflussganglinien für langen, unabhängigen Zeitraum (von NQ bis HQ) oder mehrere Einzelereignisse unterschiedlicher Größe im Gebiet und hohe Modellgüte bei der Validierung. Qn spezifisch: HQn Validierung oder Ereignis-Validierung im Gebiet mit guter Datenbasis und hoher Modellgüte, mit regionaler Informationserweiterung (HQ Statistik oder HQn spez. Parameter)	

6. Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse

Für die Interpretation der Modellergebnisse ist vor allem bei geringer Datenlage eine Unsicherheits- bzw. Sensitivitätsanalyse bzw. Plausibilisierung der Ergebnisse sehr vorteilhaft. Was ändert sich an den Ergebnissen bei unterschiedlichen Parameterannahmen oder durch Einbeziehung von Ergebnissen anderer Verfahren?


6. Generell	Generelle Vorgabe			
		Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen	Zusammenfass. Bewertung	Berichtslegung
	Interpretation und Berichte:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Detaillierte Beschreibung


6.1 Unsicherheits- / Sensitivitätsanalysen

	Eingangsdaten	Parameter	Modellstruktur	Interpretation	Empfehlung
Sensitivitätsanalyse:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	6.1 

6.2 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse und Checkliste

	Checkliste vorher	Checkliste nachher	Detaillierte hydrol. Interpretation	Detaillierte hydrol. Bewertung	
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6.2 

6.3 Berichtslegung an Auftraggeber

	Im Detail nachvollziehbar	Überblicksweise nachvollziehbar	Gliederung gemäß Regelblatt	
Bericht:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6.3 
Informationsmanagement:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Anmerkungen:

Bewertung

Argumentation:

Einstufung der Qualität:

Geschätzter Aufwand:

Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung
Unsicherheiten	sehr gering	Keine Unsicherheits- bzw. Sensitivitätsanalyse und keine Interpretation
	gering	Einfache Sensitivitätsanalyse, mögliche gegenseitige Beeinflussung von Parametern wird nicht untersucht. Einfache Interpretation der Ergebnisse
	mittel	Sensitivitätsanalyse einschließlich Beurteilung der Abhängigkeit von Parametern, und Untersuchung verschiedener Szenarien. Weitergehende Interpretation der Ergebnisse und ihrer Unsicherheiten. Checkliste vorher und nachher ausgefüllt. Bericht im Detail nachvollziehbar
	hoch	Detaillierte Unsicherheitsanalyse z.B. basierend auf Monte Carlo Simulationen mit Festlegung von Unsicherheitsbandbreiten. Umfassende Interpretation und Bewertung der Ergebnisse und ihrer Unsicherheiten in Hinblick auf Prozesse und Datensituation. Checkliste vorher und nachher ausgefüllt. Bericht im Detail nachvollziehbar. Vollständiges Informationsmanagement (Präsentationen, Digitale Archivierung aller Informationen, Source Daten freigeben).

6. Detailliert

Zusammenstellung der Bewertung

Projekttitle:

Gefahrenzonenplan Pram

	Einstufung / Bewertung	
	Qualität	Aufwand
Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen (Kapitel 2):	hoch	mittel
Modellwahl (Modellkonzepte) (Kapitel 3):	mittel / hoch	mittel / hoch
Wahl der Modellparameterwerte (Kapitel 4):	mittel / hoch	mittel
Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung (Kapitel 5):	mittel / hoch	hoch
Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse (Kapitel 6):	gering / mittel	gering

Anmerkungen:

Synthesebeispiel Weerbach

Autoren: Johannes Schöber, Johannes Bellinger, Magdalena Rogger**,
Bernhard Kohl und Stefan Achleitner*

1. Aufgabenstellung

Als ein exemplarisches Einzugsgebiet zur Konkretisierung der Empfehlungen des Regelblattes wurde das alpine Einzugsgebiet des Weerbachs (Tirol) gewählt (Abb. 8.66). Dieses Einzugsgebiet zeichnet sich durch eine umfassende Datengrundlage aus und wurde in den letzten Jahren im Rahmen zweier Projekte betreffend Wasserhaushalt und Hochwasser mit unterschiedlichen Niederschlag-Abfluss-Modellen untersucht.

* Dr. Johannes Bellinger, Wasserwirtschaftsamt Weilheim

** DI Dr. Magdalena Rogger, Technische Universität Wien

a)



b)

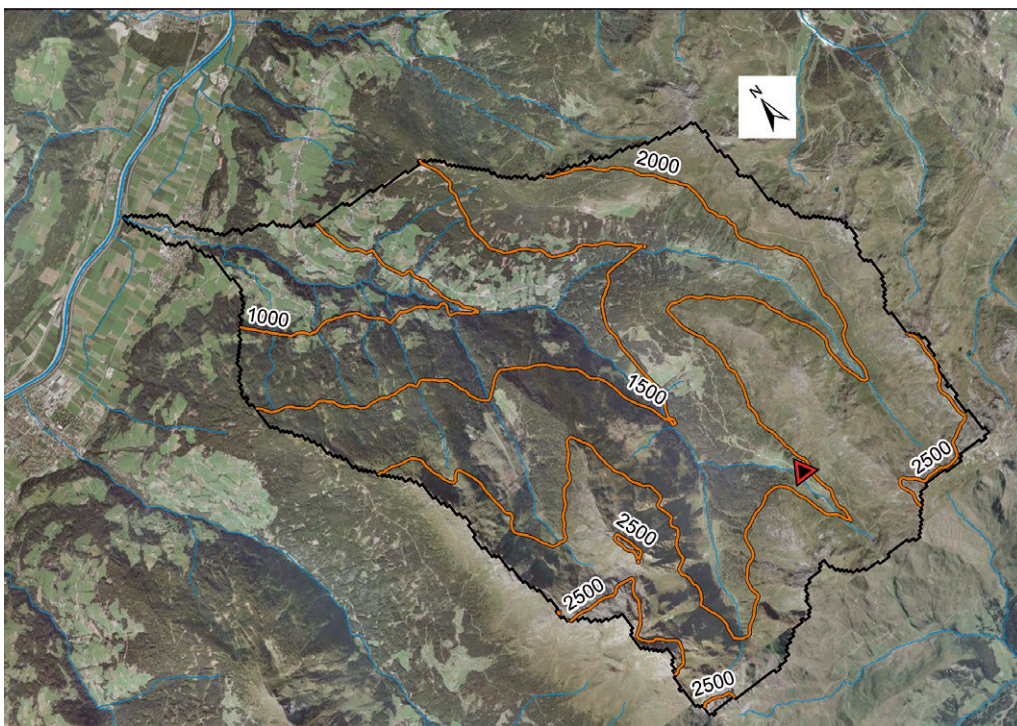


Abb. 8.66 Blick über das Weerbachgebiet: (a) Foto nahe Weidenerhütte; Blickrichtung Nord-Westen (Bildaufnahme: 01.07.2012, J. Schöber), (b) Orthofoto mit 500-m-Höhenlinien und dem Bildaufnahmestandort (Dreieck) von (a). Links oben im Orthofoto ist der Inn zu sehen

Im Rahmen des Synthesebeispiels Weerbach kann aus einem umfassenden Erfahrungsschatz berichtet werden, da in den beiden Projekten sogar drei unterschiedliche Niederschlag-Abfluss-Modelle eingesetzt wurden. Die Aufgabenstellungen der Projekte waren unterschiedlich.

- Das Projekt HOWATI – HochWasser Tirol (Rogger et al. 2011a, 2011b) hatte eine Harmonisierung der Methoden der Wildbach- und Lawinenverbauung bzw. des Wasserbaus zur Bestimmung von Hochwasserkennwerten (HQ_n) zum Ziel. Im Rahmen des Projekts wurden im Weerbachgebiet Hochwasserdurchflüsse mit dem Ereignismodell ZEMOKOST (Kohl 2011) und dem Wasserhaushaltsmodell KAMPUS (Reszler et al. 2006b; Blöschl et al. 2008a) berechnet.

- Das Projekt HoPI – Hochwasserprognose für den Tiroler Inn (Achleitner et al. 2012; Bellinger 2015; Schöber 2014) hatte die Bereitstellung eines operativen Hochwasserprognose-systems zum Ziel. Für die Abflussprognose der Innzubringer wird HQsim (Kleindienst 1996) eingesetzt. Prognostizierte Abflussganglinien werden als Input an das hydrodynamische Innmodell übergeben, welches Durchflüsse und Wasserstände des Inn von der Grenze zum Schweizer Engadin bis zur Bayerischen Grenze in der Nähe von Kufstein berechnet.

Die verschiedenen Projektanwendungen (Ereignismodell vs. Wasserhaushaltsmodell, statistische Hochwasserkennwerte vs. Hochwasserprognosen) führten zu unterschiedlichen Datenanforderungen und unterschiedlicher Detailliertheit bei der Charakterisierung des Einzugsgebiets und der abflussrelevanten Prozesse, wobei der Fokus jedoch in allen Fällen auf Hochwassersimulationen mit Niederschlag-Abfluss-Modellen lag. Bei beiden Projekten handelt es sich um wasserwirtschaftliche Fragestellungen mit mittlerem Schadenspotenzial (z. B. ist für die Hochwasserprognose am Inn der Weerbach nur ein kleines Teilgebiet) mit mittelkomplexen bis komplexen hydrologischen Verhältnissen, weshalb gemäß **Box 1.2** die hydrologische Kategorie 2 vergeben wird.

2. Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen

2.1. Gebietsüberblick und Gebietseigenschaften

2.1.1. Landschaftliche Einordnung

Der Weerbach (72,8 km²) ist ein orografisch rechter Zubringer zum Inn im Tiroler Unterland (**Box 2.1**). Das Einzugsgebiet liegt in den Tuxer Alpen und wird durch eine große Höhenerstreckung von 560 bis über 2.500 m ü. A. charakterisiert. Die Abflussmessungen vom Pegel Weer – der Pegel liegt knapp oberhalb der Mündung in den Inn – werden vom Hydrographischen Dienst Tirol durchgeführt. Abflussdaten liegen ab dem Jahr 1971 vor. Das größte Hochwasserereignis der Datenreihe ereignete sich am 6. August 1985 mit einem Spitzenabfluss von 34,4 m³/s. Das zweitgrößte Ereignis war deutlich kleiner und hatte einen Scheitelabfluss von 21 m³/s (23. August 2005). Die mittlere Jahresniederschlagshöhe der Station Weerberg liegt bei rund 1.060 mm/a. Bis zum Oberlauf steigt der mittlere Jahresniederschlag auf rund 1.700/a mm an (BMLFUW 2003, 2005, 2007). Die geologischen Verhältnisse werden von Quarzphyllitserien dominiert. Aufliegend oder anschließend finden sich Lockersedimentkörper (Moränen, Hangschutt, Terrassenschotter und Schwemmkegel). Die unteren Bereiche des Einzugsgebiets sind bewaldet (hauptsächlich Nadelwald), darüber schließt eine Zone alpiner Rasenflächen an. Die vegetationsarme Gipfelzone ist durch Fels und Schutt dominiert.

2.1.2. Topografie, Gewässernetz, wasserwirtschaftliche Maßnahmen

Die Flächen-/Höhenverteilungen des Weerbachs sind in Abb. 8.67 dargestellt. Ein Geländemodell mit 10 m Auflösung auf Basis Laserscanning aus dem Jahr 2006 wurde vom Land Tirol (TIRIS) bezogen und für alle drei Modellierungen verwendet.

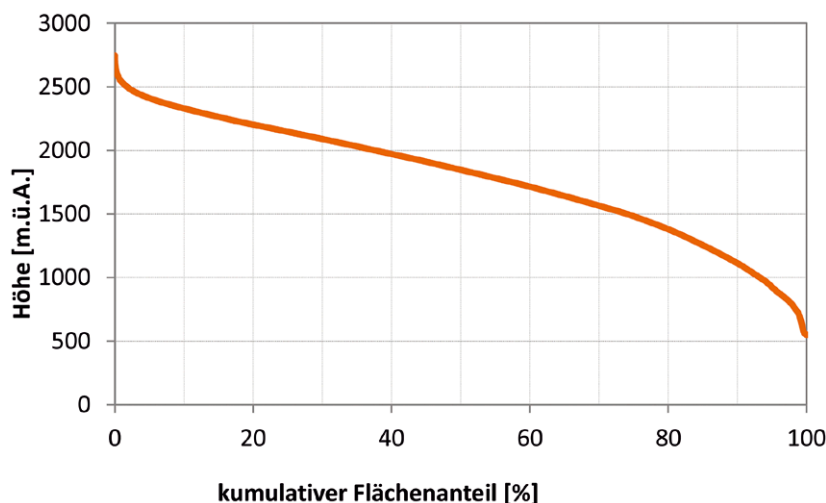


Abb. 8.67 Hypsografische Kurve des Einzugsgebiets des Weerbachs (72,8 km²)

Neben Geländeparametern wie Höhe, Neigung oder Exposition können auf Basis des digitalen Geländemodells Einzugsgebietsgrenzen und Verlauf von Gerinneabschnitten mit verschiedenen GIS-Werkzeugen abgeleitet werden. Wie in **Box 2.2** empfohlen wurden im HOWATI-Projekt maßgebliche Gerinneabschnitte des Weerbachs punktuell im Gelände angesprochen und dabei nach Möglichkeit Gerinneprofile, Rauigkeiten sowie aktuelle und potenziell maximale Durchflussraten geschätzt.

Eine wasserwirtschaftliche Nutzung des Weerbachs erfolgt im Rahmen mehrerer Wasserentnahmen entlang des Bachverlaufs, mit denen Kleinwasserkraftwerke Energie erzeugen. Die größte Entnahme (2.400 l/s; Wasserbuch Tirol Postzahl 3/573) erfolgt am Unterlauf des Weerbachs. Keines der im Folgenden beschriebenen Modelle berücksichtigt diese Nutzung, da die Kraftwerke über keine nennenswerten Speicherkapazitäten verfügen und die Ausleitungsstrecken entlang der Bäche relativ kurz sind, weshalb sich auch keine großen Verände-

rungen der Fließzeiten ergeben. Im Hochwasserfall kann davon ausgegangen werden, dass die Kraftwerke den Betrieb einstellen und kein Wasser aus dem Bach ausgeleitet wird. Im Rahmen von Wasserhaushaltsmodellierungen muss dann aber berücksichtigt werden, dass die wasserwirtschaftliche Nutzung nicht in den simulierten Ganglinien wiedergegeben werden kann. Auch wenn die Auswirkungen in diesem Gebiet relativ gering sind, sollte dieser Aspekt bei der Kalibrierung und Validierung der Modelle berücksichtigt werden.

2.1.3. Geologie, Boden

Neben der Topografie und dem Gewässernetz werden auch Daten bezüglich Boden, Geologie und Hydrogeologie sowie Vegetation und Landnutzung benötigt. Im HOWATI-Projekt wurden für das Weerbachgebiet umfassende Datengrundlagen im Zuge von Begehungen und Kartierungen gewonnen. Zusammen mit digitalen Gebietsdaten hat sich für dieses Projekt eine besonders umfangreiche Datengrundlage ergeben. Abb. 8.68 zeigt die Karte, in der die hydrogeologischen Abflussprozessklassen dargestellt sind, welche auf Basis von geologischen Karten, Orthofotos und einem digitalen Geländemodell erstellt und während der Feldbegehungen verifiziert wurden (Pirkl 2012). Die Abflussklassen sind eine wesentliche Grundlage für die Modell- und Parameterwahl. Im Rahmen der Hochwasserprognose für den Inn wurden hingegen vor allem verfügbare Geländedaten einer geringeren maßstäblichen Auflösung verwendet, um die Datengrundlagen in allen Teilgebieten des etwa 10.000 km² großen Inngebiets zu vereinheitlichen. Beispielhaft wird in Abb. 8.69 die verwendete Kartengrundlage für die Bodentypen (BMLFUW 2003, 2005, 2007) gezeigt, welche in Kombination mit der Landbedeckungskarte und der Topografie die Grundlage für die Abgrenzung der Hydrotöpfe bildet. Es wird angemerkt, dass die umfangreiche Datengrundlage des HOWATI-Projekts bei manchen Projekten der Praxis nicht zur Verfügung stehen wird, wodurch mit einer reduzierter Genauigkeit der Modellierung zu rechnen ist. Dennoch ist es ratsam, wie in **Box 2.2.** empfohlen, die Einzugsgebietsdaten zumindest stichprobenartig vor Ort zu überprüfen, insbesondere wenn in einem Projekt fertige Datenprodukte verwendet werden.

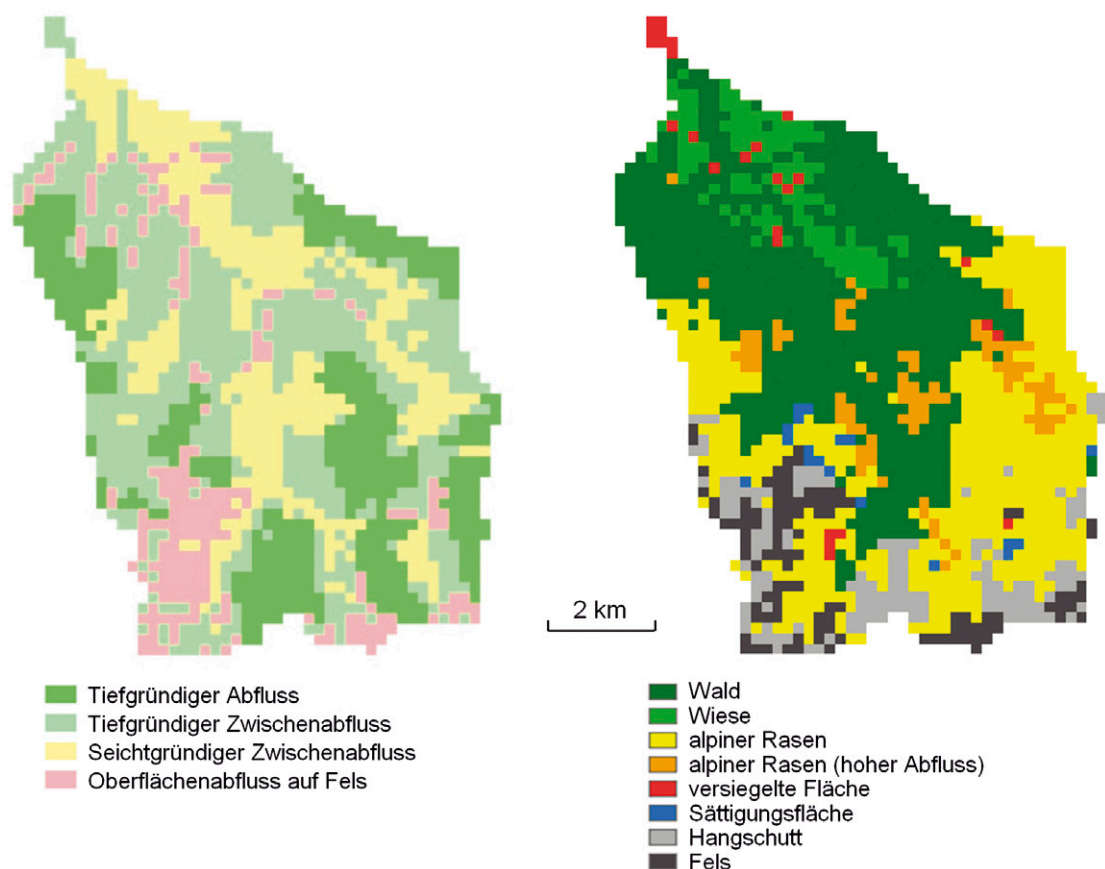


Abb. 8.68 Gliederung des Weerbachgebiets in (a) hydrogeologische Abflussprozesse und (b) Landnutzungs- klassen im Rahmen von HOWATI (Rogger et al. 2011ab)

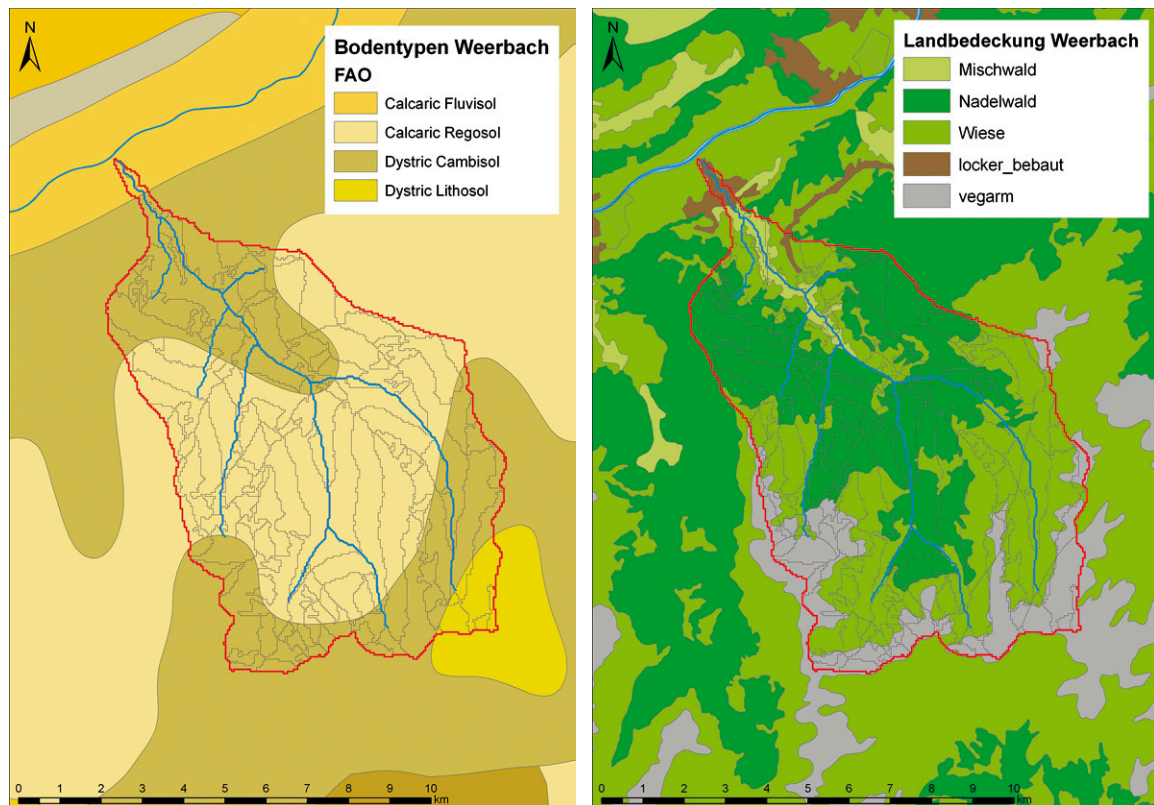


Abb. 8.69 Datenquellen für die Modellierung mit HQsim im Rahmen von HoPI. Links: Bodenkarte aus dem Hydrologischen Atlas von Österreich, rechts: Corine-Landbedeckungskarten

2.1.4 Vegetation, Landnutzung

In Abb. 8.68 und Abb. 8.69 werden die in den Projekten Hochwasserprognose Inn und HOWATI verwendeten Daten zu Vegetation und Landbedeckung gezeigt. Im Projekt HoPI wurden zur Charakterisierung der Landbedeckung im Einzugsgebiet CORINE-Daten verwendet, die für ganz Österreich in einem Maßstab von 1:100.000 (Stand 2006) vorliegen. Die detaillierteren Landbedeckungsdaten des HOWATI-Projekts wurden im Zuge von umfangreichen Feldbegehungen gewonnen. Die jeweiligen Datengrundlagen repräsentieren den Aufnahmezeitpunkt der Kartierung oder des verwendeten Satellitenbilds. Landnutzungsänderungen wurden in beiden Projekten nicht berücksichtigt.

2.1.5. Kombinierte Informationen: Abflussdisposition, Abflussbeiwerte

Abflussbeiwertsklassen und Oberflächenrauigkeitsklassen wurden im Rahmen des HOWATI-Projekts für ZEMOKOST und KAMPUS durch umfangreiche Feldbegehungen nach der provisorischen Geländeanleitung (Markart et al. 2004) erstellt. Die Verteilungen der jeweiligen Klassen sind in Abb. 8.70 gezeigt. Der zeitliche Aufwand zur Erstellung von Datengrundlagen mit solchem Detailgrad ist hoch und liegt bei rund 3 Geländetagen und ca. 5 Tagen Datenvorbereitung und Nachbearbeitung mit GIS. In Hinblick darauf, dass für die Modellierungen mit ZEMOKOST die Geländedaten zur A-priori-Abschätzung der Modellparameter verwendet werden und später keine Kalibrierung anhand von Abflussdaten durchgeführt wird, erscheint dieser Aufwand gerechtfertigt. Für HQsim werden keine Abflussbeiwertsklassen als Datengrundlage benötigt, da die abflussbeitragende Fläche und die Infiltration aus der modellierten Wasserbilanz und den Bodenkenngrößen berechnet werden.

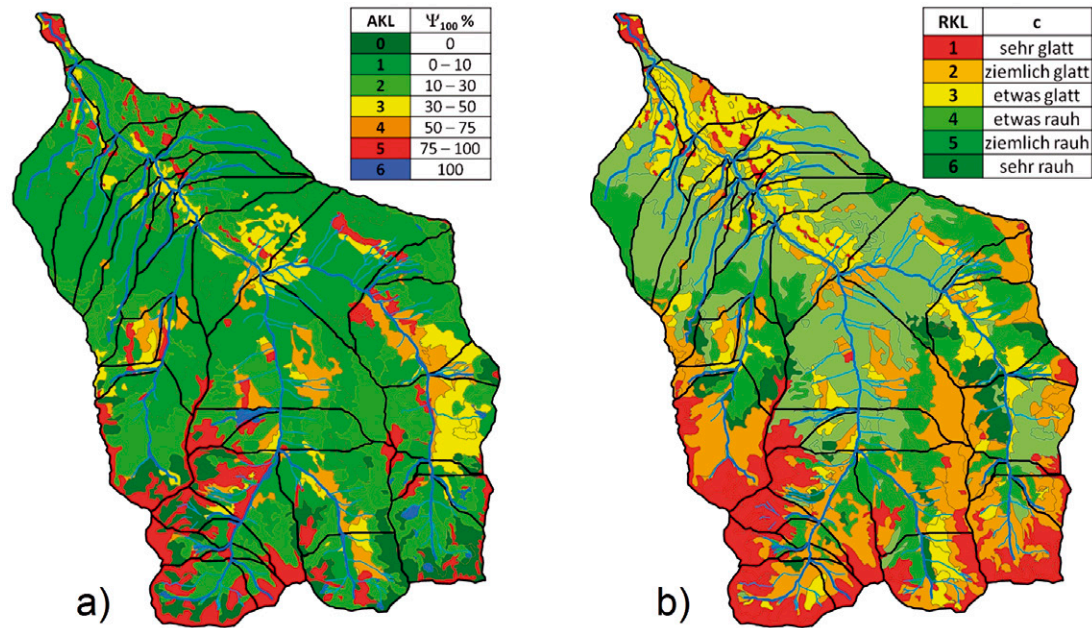


Abb. 8.70 (a) Abflussbeiwertklassen (AKL), (b) Klassen der Oberflächenrauigkeiten (RKL), Einzugsgebiet Weerbach (Rogger et al. 2011ab)

2.2. Niederschlag und andere meteorologische Größen

2.2.1. Erhebung und Auswahl von Stationsdaten

Dem Regelblatt folgend sollen möglichst alle Niederschlagsstationen im Gebiet verwendet werden. In Abb. 8.71 sind die verfügbaren meteorologischen Stationen im Gebiet des Weerbachs dargestellt – im Einzugsgebiet befindet sich keine automatische Wetterstation. Gemäß **Box 2.3** wurden deshalb die umliegenden Stationen herangezogen. Im Zuge von umfassenden Datenerhebungen wurde die Verfügbarkeit weiterer benötigter Eingangsdaten (z. B. häufig Lufttemperatur) überprüft. Beide Projekte am Weerbach haben die Simulation von Hochwässern als Ziel, weshalb die zeitliche Auflösung der Modellierung – und somit der Eingangsdaten – entsprechend der Prozessdynamik des alpinen Einzugsgebiets mit einer Fläche < 100 km² zu wählen ist und somit Zeitschrittweiten in Größenordnungen von Minuten (ZEMOKOST) bis zu einer Stunde (HoPI) verwendet wurden. Deswegen wurden im Projekt HOWATI korrigierte Daten der dem Gebiet nahe gelegenen automatischen Wetterstation Wattener Lizum verwendet.

2.2.2. Datenprüfung und Korrektur

Entsprechend **Box 2.4** sollte man darauf achten, ob geprüfte Daten oder Rohdaten verwendet werden. Weiters sollten auch die Stationsmetadaten eingesehen werden (z. B. hinsichtlich Stationsverlegung). Im vorliegenden Beispiel wurden ausschließlich Zeiträume mit vom Hydrographischen Dienst und der ZAMG geprüften Daten verwendet. Auch wenn es sich um geprüfte Daten handelt, wurden sie zusätzlich visuell kontrolliert (**Box 2.4**) und die Daten automatischer Wetterstationen mit den Messungen der Tagessummen (z. B. Ombrometerdaten Weerberg in Tagesauflösung) verglichen. Es zeigte sich, dass die Messwerte zum HHQ des Weerbachs im Jahre 1985 unsicher sind (Rogger et al. 2012b), was bei den Auswertungen berücksichtigt wurde.

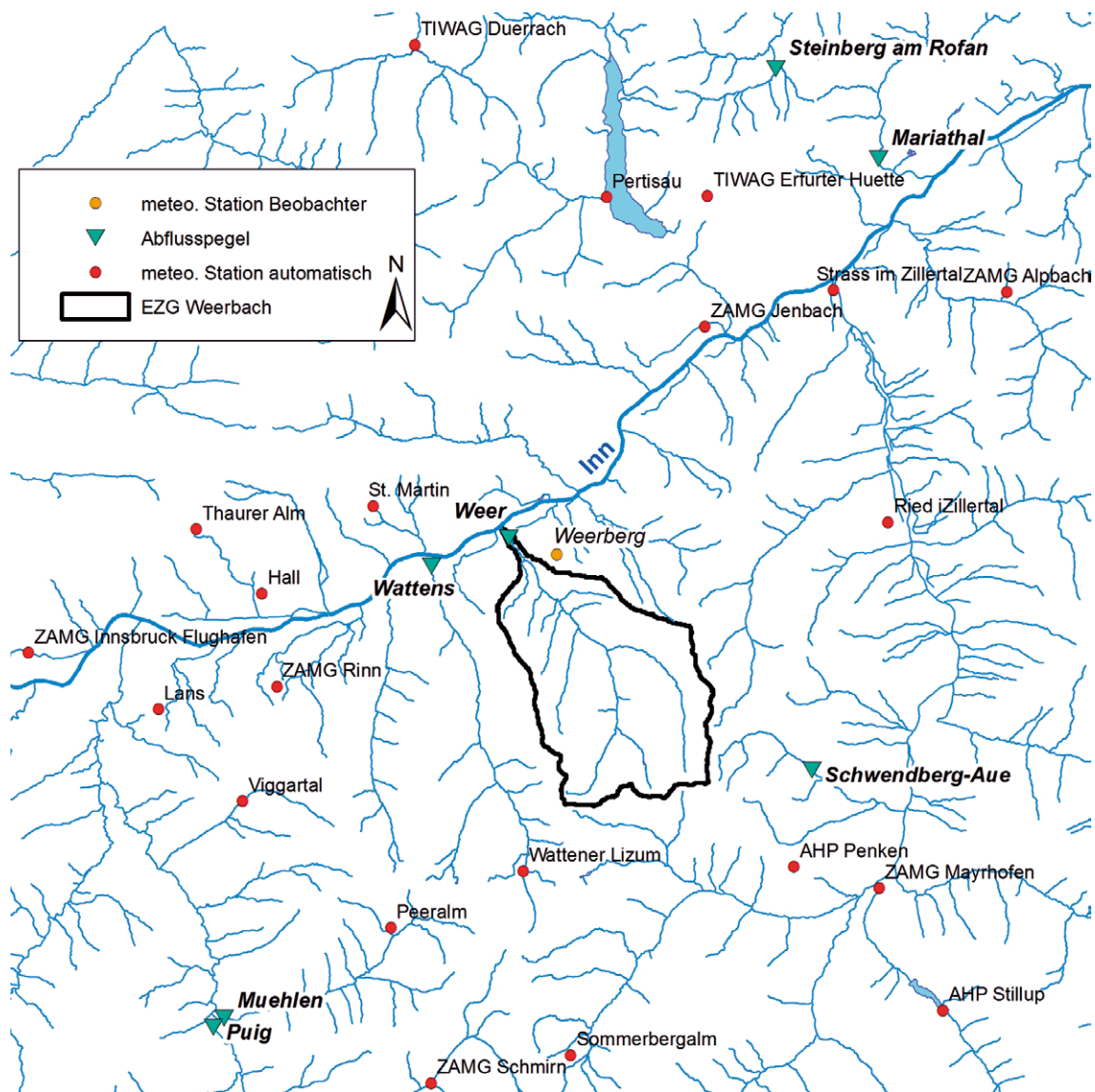


Abb. 8.71 Einzugsgebiet des Weerbachs im Tiroler Unterland mit hydro-meteorologischen Stationsmessungen (automatisch: zeitliche Auflösung < 1 h, Beobachter: zeitliche Auflösung = 1 d). Die Stationen werden von verschiedenen Institutionen betrieben, die dem Weerbach am nächsten gelegene Station Wattener Lizum vom HD Tirol. Zusätzlich dargestellte Abflusspegel werden zu Vergleichszwecken verwendet.

2.2.3. Niederschlagsstatistik und Bemessungsniederschläge

Die eHYD-Bemessungsniederschläge (Weilguni 2009) liegen auf einem Raster von 6 km vor. **Box 2.5** folgend wurden für die HQ_n -Ereignissimulationen mit ZEMOKOST am Weerbach die Regenspendenlinien des gewichteten eHYD-Bemessungsniederschlags verwendet. Für KAMPUS wurde ein stochastisches Niederschlagsmodell (Sivapalan et al. 2005) zur Generierung einer 10.000 Jahre langen Niederschlagsreihe als Modellinput herangezogen. Das Niederschlagsmodell wurde mithilfe der gemessenen Niederschlagsdaten der Station Wattener Lizum kalibriert, mit dem Ziel, dass die generierte Reihe die gleichen statistischen Eigenschaften besitzt wie die gemessene Reihe. Modellparameter sind dabei beispielsweise die Niederschlagsdauer und die durchschnittliche Niederschlagsintensität. In Abb. 8.72 ist als Beispiel ein Vergleich der Monatsmittel der generierten Daten mit den Monatsmitteln der Messdaten dargestellt.

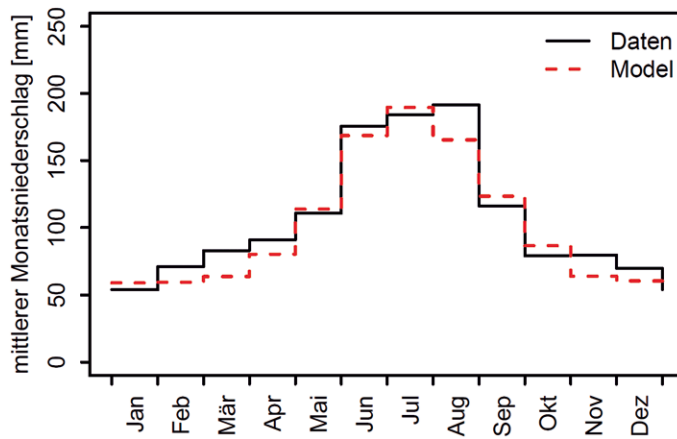


Abb. 8.72 Monatsmittel der generierten Niederschläge im Vergleich zur Messreihe (Wattener Lizum)

2.2.4. Zeitliche Verteilung des Ereignisniederschlags

Für die Modellierungen mit ZEMOKOST wurden Blockregen mit allen Dauerstufen von eHYD verwendet, für KAMPUS eine stochastische Verteilung des Niederschlags innerhalb der Ereignisse entsprechend Sivapalan et al. (2005).

2.2.5. Räumliche Verteilung des Niederschlags

(a) Abminderung des Bemessungsniederschlags

Für ZEMOKOST wurde eine räumliche Verteilung des Niederschlags gewählt, die von der Dauerstufe abhängt (Abb. 8.73). Der definierte Niederschlagskern liegt zwischen dem Oberlauf des Weerbachs und dem Nurpensbach über der Weidener Hütte im Nafingtal (siehe auch Abb. 8.66). Die dargestellte räumliche Abminderung wurde entsprechend der sanften Flächenabminderung nach Lorenz und Skoda (2002) nachempfunden (Box 2.7). Weitere Beispiele mit verändertem Regenschwerpunkt und sanfter modifizierter Flächenabminderung nach Blöschl können Abb. 2.18 des Regelblattes entnommen werden.

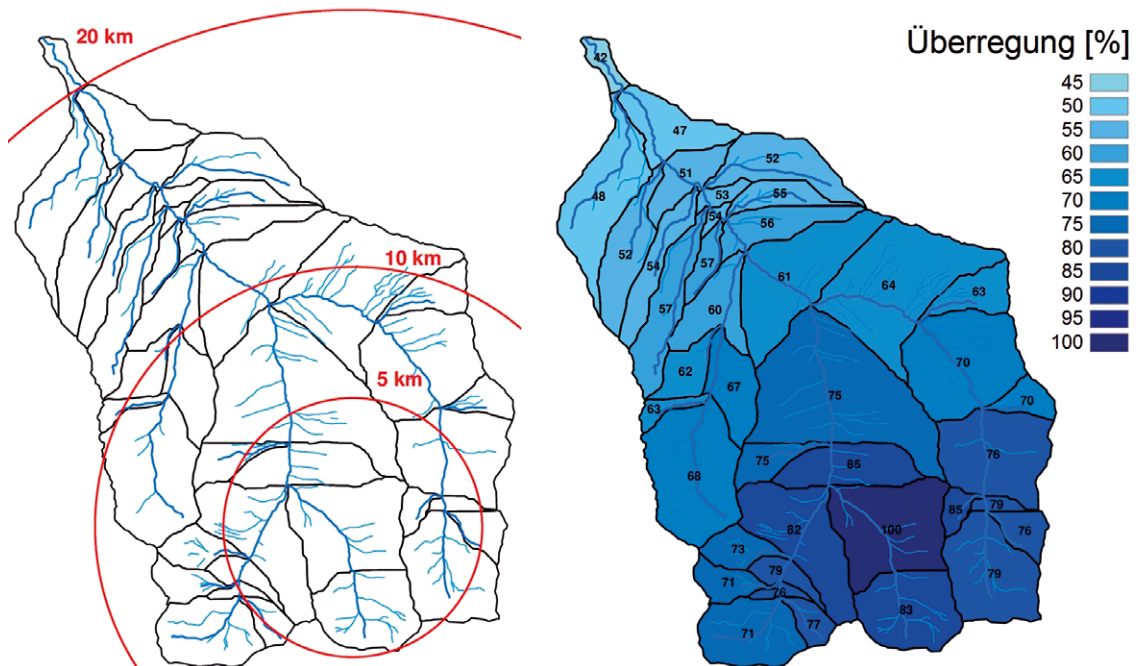


Abb. 8.73 Flächenabminderung des Bemessungsniederschlags: Gebietseinteilung ZEMOKOST und Überregung in Prozent des Maximums für eine Dauerstufe von 60 Minuten

(b) Räumliche Interpolation von Zeitreihen des Niederschlags an Stationen

Im HoPI-Projekt wurden Niederschlagsdaten der umliegenden Stationen verwendet. Gemäß **Box 2.8** wurden möglichst viele automatische Stationen zur Ermittlung des Gebietsniederschlags herangezogen. Im Hochwasserfall ist die räumlich verteilte Information notwendig und es können einzelne Stationsausfälle damit kompensiert werden. Die Stationsdaten wurden über die Distanzgewichtungsmethode auf ein Niederschlagsraster (5 x 5 km) interpoliert. Die räumliche Auflösung dieses Rasters stellt dabei einen Kompromiss zwischen räumlich sinnvoller Auflösung hinsichtlich Einzugsgebietstopografie, Stationsdichte und Berechnungsaufwand dar. Alternativ stehen auch die Gebietsniederschläge der INCA-Analysedaten der ZAMG zur Verfügung.

(c) Schneedaten im Gebiet

An der Station Weerberg (Abb. 8.71) werden Tagessummen des Neuschnees und Tageswerte der Schneehöhe aufgezeichnet. Der Windeinfluss (**Box 2.9**) wurde als gering angesehen, jedoch ist die Repräsentativität dieser Messstelle im Dauersiedlungsraum für ein alpines Einzugsgebiet eher gering. Auch die Daten der automatischen Schneeforschungsstation Wattener Lizum im Gebiet des benachbarten Wattenbachs (siehe Helfricht et al. 2018) wurden als Zusatzinformation verwendet. Die Größenordnungen des Schneewasseräquivalents wurden mittels anderer österreichischer Messstellen (Achleitner und Schöber 2017; Krajči et al. 2017) plausibilisiert. Für die Kalibrierung im Rahmen des HoPI-Projekts wurden MODIS-Schneekarten verwendet. Für ein Hochwasserprognosesystem eignen sich diese Daten als Zusatzinformation (z. B. zur Einschätzung der Abflussdisposition vor einem prognostizierten Regenereignis) oder zur laufenden Plausibilisierung der Modellresultate. Vor der Nutzung dieser Daten wurde der Grad der Wolkenbedeckung geprüft, der vor allem während Niederschlagsperioden hoch ist.

(d) Gebietswerte der Lufttemperatur

Für KAMPUS und HQsim werden als weitere Eingangsdaten die Lufttemperatur und der Temperaturgradient benötigt. Für beide Modellanwendungen wurden die Temperaturgradienten aus den Zeitreihen der umliegenden Stationen mittels Regression bestimmt. Gemäß **Box 2.9** wurde auf die Einhaltung physikalisch plausibler Grenzwerte der Temperaturgradienten geachtet. Mittels Temperaturgradient und Höheninformation (Abb. 8.67) wurden die Temperaturen für jede Höhenzone im Einzugsgebiet zu jedem Zeitschritt berechnet. ZEMOKOST benötigt keine Temperaturdaten, da die Modellierung keine Schneesimulation berücksichtigt.

(e) Gebietswerte der Verdunstung

KAMPUS und HQsim berechnen die Verdunstung modellintern, es wurden deshalb keine Verdunstungsdaten verwendet.

2.2.6. Niederschlagsprognosen und Klimawandel

Für die Prognosen in HoPI werden die INCA-Niederschlagsprognosen der ZAMG mit einem Prognosehorizont von 120 Stunden verwendet. Neben zwei deterministischen Niederschlagsprognosen stehen stündlich auch 17 Niederschlagsensembles zur Berechnung von probabilistischen Abflussprognosen zur Verfügung. In den Projekten HOWATI und HoPI wurden keine Klimaszenarien analysiert.

2.3. Abfluss

2.3.1. Erhebung und Auswahl von Stationsdaten

In den Projekten HOWATI und HoPI wurden die Abflussdaten des Pegels Weer verwendet. Weitere Pegeldaten sind am Weerbach nicht verfügbar. **Box 2.11** folgend wurden Zusatzinformationen aus Ereignisdokumentationen und Chroniken gewonnen.

2.3.2. Datenprüfung und Korrektur

Die Abflussdaten des Pegels Weerbach wurden durch den Hydrographischen Dienst geprüft. Zusätzlich wurden sie einer visuellen Prüfung (**Box 2.12**) unterzogen. Für den Weerbach ist dabei ein Vergleich mit dem im Westen angrenzenden Wattenbach (73,9 km²) sinnvoll. Die Einzugsgebiete beider Bäche sind fast gleich groß und beide haben eine Messstelle knapp vor der Mündung in den Inn (Abb. 8.71). Wie Abb. 8.74 zeigt, weisen beide Bäche ein ähnliches Abflussverhalten auf. In den abflussarmen Wintermonaten wird die wasserwirtschaftliche Nutzung beider Bäche sichtbar. Bei dem nivalen Abflussregime treten die höchsten Abflüsse üblicherweise im Juni auf. Das abgebildete Hochwasser Anfang Juni 2012 war am Weerbach stärker ausgeprägt als am Wattenbach. Während beide Bäche sehr ähnliche Abflüsse in der Schneeschmelzperiode des Jahres 2013 aufweisen (unteres Diagramm in Abb. 8.74), unterscheiden sich die Abflüsse von Anfang Mai bis Mitte Juni 2012 deutlich (oberes Diagramm). Diese Abweichungen wurden mit dem Messstellenbetreiber (HD Tirol) abgeklärt (**Box 2.12**). Am Pegel Wattens ergaben sich nach Neuinstallation des Wasserstandsgebers Anfang April 2012 Fehler in der Wasserstandsaufzeichnung (Messwertverschiebung). Die Wasserstandsdaten wurden im Zeitraum 04.06.2012 bis 14.06.2012 korrigiert, wodurch sich die Ganglinien angenähert haben. Trotzdem können die Abweichungen dadurch nur teilweise erklärt werden, denn zusätzliche händische Durchflussmessungen in dieser Periode belegen die verbleibenden Abflussunterschiede im Mai 2012. Laut Auskunft des Messstellenbetreibers werden solche unterschiedlichen Abflüsse immer wieder an den beiden Bächen beobachtet, die vermutlich auf unterschiedliche Schneeverhältnisse und gewisse Unterschiede in den Gebietscharakteristiken (das Gebiet des Wattenbachs ist beispielsweise etwas steiler als das Weerbachgebiet) zurückzuführen sind.

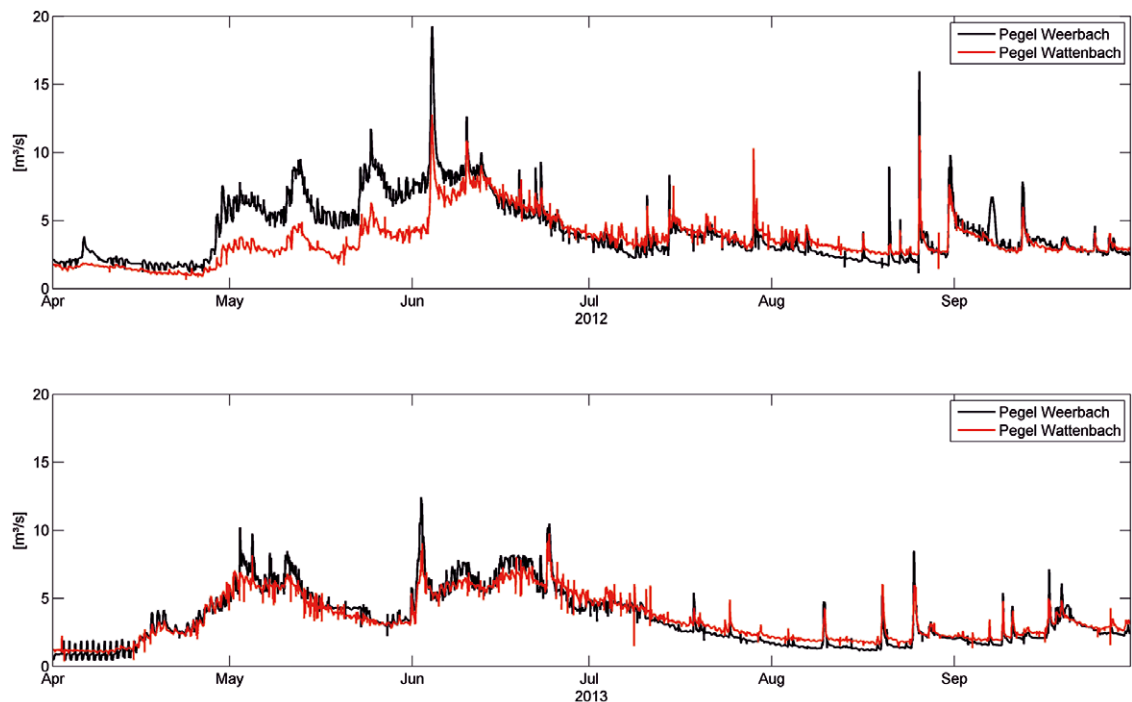


Abb. 8.74 Abfluss Weerbach (72,8 km², schwarze Kurve) im Vergleich zum Wattenbach (73,9 km², rote Kurve). Oberes Diagramm: Jahr 2012, unteres Diagramm: Jahr 2013

2.3.3. Ereignisdokumentation

Die in **Box 2.13** empfohlenen Ereignisdokumentationen werden in Kapitel 5.2. dieses Synthesebeispiels zur Plausibilisierung verwendet.

2.3.4. Lokale und regionale Abflussstatistik

Zur Einschätzung der Jährlichkeit der modellierten Hochwasserabflüsse wurde eine begleitende hochwasserstatistische Auswertung durchgeführt (**Box 2.14**). Für den Weerbach wird ein Abfluss in der Größenordnung von 20 m³/s (Abb. 8.74, Jahr 2012) zufolge der Jahresreihe 1971 bis 2013 (eHYD) statistisch als HQ_{10} eingeordnet (GEV-Momentenmethode, siehe Abb. 75a). Die Jahreshochwässer treten ausschließlich in den Monaten Mai bis August auf, was mit dem nivalen Abflussregime und den großen Sommerniederschlägen zusammenhängt.

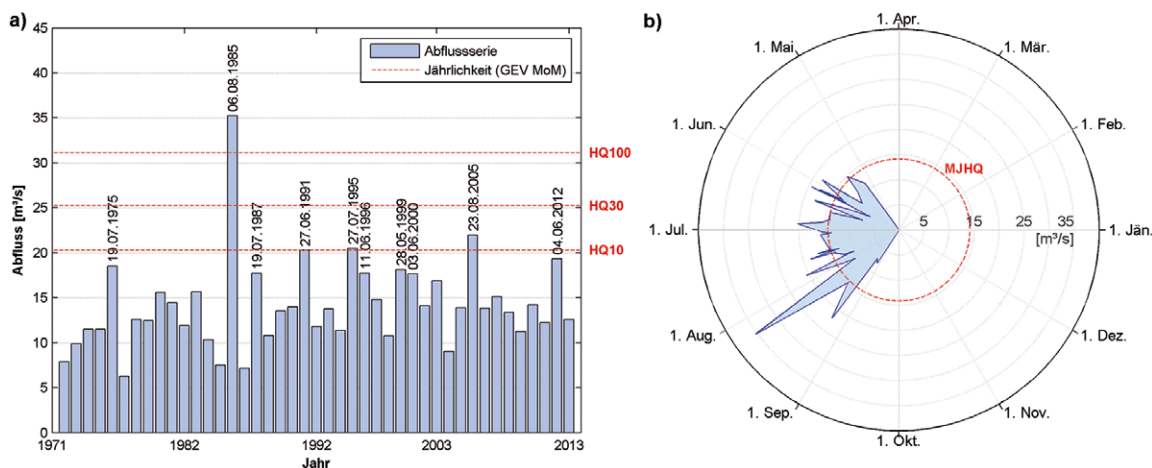


Abb. 8.75 Pegel Weer, Weerbach, EZG 72,8 km²: (a) Hochwasserserie AMS im Zeitraum 1971 bis 2013, (b) Auftreten der jährlichen Hochwasserspitzen (Saisonalität, Darstellung nach Schneeberger et al. 2012)

3. Modellwahl

3.1. Kriterien für die Modellwahl

Entsprechend **Box 3.1** wurde die Modellwahl auf Basis der Kriterien Aufgabenstellung, Datenerfordernis und -verfügbarkeit, relevante hydrologische Prozesse und praktische Erfahrung mit den Modellen getroffen. Im HOWATI-Projekt fokussierten die Modellierungen mit KAMPUS und ZEMOKOST auf statistische Hochwasserkenngößen des Weerbachs. KAMPUS berücksichtigt dabei auch Schneeakkumulation und -ablation sowie Verdunstung. ZEMOKOST als Ereignismodell berücksichtigt diese Prozesse nicht, die Abflussbildung wird über Ereignisabflussbeiwerte gesteuert, deren Größenordnung aus Berechnungsversuchen abgeleitet wird. Das HQsim-Modell des Weerbachs ist Teil des Hochwasserprognosesystems für den Tiroler Inn (HoPI) und berücksichtigt ebenfalls Schnee- und Verdunstungsprozesse. Alle Modelle bilden die hochwasserrelevanten hydrologischen Prozesse eines steilen alpinen Einzugsgebietes mit kurzen Fließwegen, Oberflächenabfluss auf Fels, (Tiefen-)Versickerung in Schuttkörpern, Schneeschmelze etc.) ab, und sind dabei auch in der Lage, Extremereignisse wiederzugeben (**Box 3.1**).

3.2. Modelltypen und raum-zeitliche Gliederung des Modells

3.2.1. Kausalität

Gemäß **Box 3.2** sind für die Hochwassersimulation – die i. A. eine Extrapolierbarkeit auf Situationen, die nicht in den Daten enthalten sind, voraussetzt – Grey-Box-Modelle den Black-Box-Modellen vorzuziehen. Alle drei Modelle sind Grey-Box-Modelle und entsprechen somit dieser Empfehlung.

Für Vergleichszwecke mit KAMPUS wurde das Ereignismodell ZEMOKOST unter der Annahme, es gäbe keine Abflussdaten im Einzugsgebiet, verwendet. ZEMOKOST wurde für unbeobachtete Einzugsgebiete entwickelt. Anstelle einer Kalibrierung anhand von Abflussdaten erfolgt die Abschätzung der Modellparameter basierend auf Gebietsdaten. KAMPUS und HQsim sind Wasserhaushaltsmodelle, die die Systemzustandsgrößen (Bodenwasserhaushalt, Verdunstung, Schneespeicher, Gerinnespeicher) bilanzieren. Im Vergleich zu ZEMOKOST besitzen sie mehr Parameter und benötigen die Lufttemperatur als weitere Eingangsgröße neben dem Niederschlag.

3.2.2. Räumliche Gliederung

HQsim und ZEMOKOST sind halbverteilte Hydrotop-Modelle, KAMPUS ein Rastermodell. Der Vorteil gegenüber Blockmodellen liegt in ihrer Fähigkeit, flächendetaillierte Eingangsdaten zu verwerten und gebietsinterne Ergebnisse auszuweisen (**Box 3.3**). ZEMOKOST benötigt räumlich verteilte Gebietsdaten für die Parameterwahl, weshalb das Einzugsgebiet nach Homogenbereichen, markanten Knotenpunkten und Prozessschnittstellen in 40 Teilgebiete gegliedert wurde (Abb. 8.76, links). Geländemorphologie, Vegetation, Boden und Landnutzung lieferten die Grundlagen zur Abgrenzung hydrologisch gleichartig wirkender Teilflächen (Hydrotope, Abb. 8.76, rechts).

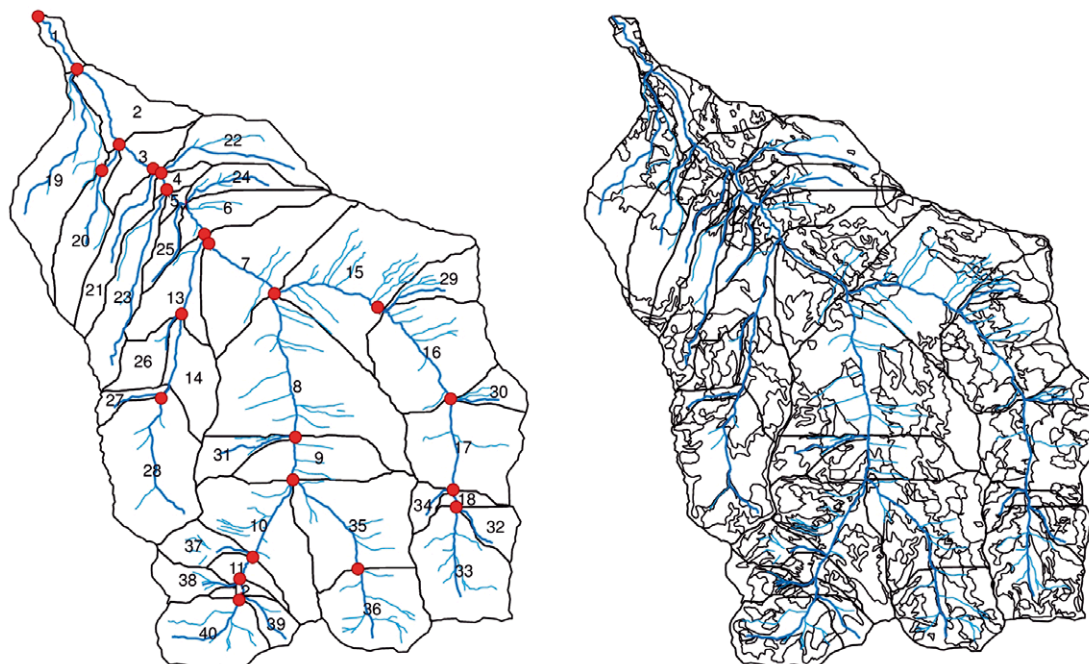


Abb. 8.76 Teileinzugsgebietsgliederung mit Haupt- und Nebengerinnen sowie Aufnahmepunkte der Gerinneprofile rot eingetragen (links) und Hydrotopgliederung (rechts) des ZEMOKOST-Modells

Die Einteilung der Hydrotope in HQsim erfolgte semi-automatisch mit einer GIS-Software. Aufgrund des großen Einflusses der Schneeschmelze auf den Abfluss (Abb. 8.74) wurde in Anlehnung an **Box 3.3** das Einzugsgebiet des Weerbachs in 250-m-Höhenstufen unterteilt. Neben der Höhe floss auch die Exposition in räumlich generalisierter Form ein (um die Zahl der Teilflächen nicht zu groß werden zu lassen). Diese Daten wurden mit der Bodenkarte verschnitten. Insgesamt ergaben sich dadurch 51 Hydrotope mit einer mittleren Größe von 1,4 km². Diesen Hydrotopen wurden Vegetationsparameter zugewiesen, weshalb jede Teilfläche entsprechend der vorherrschenden Landbedeckung spezifische Parameterwerte aufweist (z. B. LAI) (Abb. 8.69).

Für KAMPUS wurde eine räumliche Auflösung von 0.04 km² (200 x 200 m) als Kompromiss zwischen Detaillierung und Rechenzeit gewählt. Neben Orthofotos und der Landnutzung nach Seger (2001) wurden die Daten aus Abb. 8.68 und Abb. 8.70 verwendet. Die Bestimmung der Hydrotopklassen erfolgte nicht durch ein Verschneiden der unterschiedlichen GIS Karten, sondern durch einen Vergleich und eine hydrologische Interpretation der vorhandenen Informationen. Es wurden 8 Hydrotopklassen definiert, für die ein unterschiedliches hydrologisches Verhalten zu erwarten ist (Abb. 8.68).

3.2.3. Zeitliche Gliederung

ZEMOKOST entspricht als Ereignismodell einer typischen Anwendung für die Hochwasserbemessung (**Box 3.4**). Für die Hochwasserbemessung können aber auch die Anfangsbedingungen (Bodenfeuchte, Schneebedeckung etc.) von entscheidender Bedeutung sein. Diese werden in KAMPUS, einem kontinuierlichen Modell, simuliert. Für die Abflussprognose sind die Anfangsbedingungen jedenfalls wichtig. Diese werden in HQsim, einem ebenfalls kontinuierlichen Modell, simuliert.

Abflussschwankungen in einem kleinen alpinen Gebiet wie dem Weerbach liegen typischerweise im Minutenbereich. Für KAMPUS wurde dementsprechend eine zeitliche Auflösung von 15 Minuten gewählt, die auch der Auflösung der Niederschlags- und Abflusszeitreihen entspricht. ZEMOKOST rechnet in Minutenschritten auf Basis der Bemessungsniederschläge (Blockregen). Da für das Projekt HoPI die wesentlichen Zubringereinzugsgebiete mehrere 100 km² groß sind und die meteorologischen Prognosen stündlich verfügbar sind, wurde für HQsim eine zeitliche Auflösung von einer Stunde gewählt.

3.3. Berechnungsansätze einzelner Prozesse in Niederschlag-Abfluss-Modellen

3.3.1. Interzeption, Verdunstung und Schnee

Als Ereignismodell berücksichtigt ZEMOKOST weder Interzeption noch Verdunstung. HQsim berücksichtigt Interzeption in Form eines einfachen Linearspeichers. Bei Vorhandensein von Vegetation trifft Niederschlag erst am Boden auf, wenn der Interzeptionsspeicher, der im Laufe eines Jahres variiert, gefüllt ist. Gemäß **Box 3.6** wird für die Berechnung der potenziellen Verdunstung die Penman-Monteith-Gleichung empfohlen. Da aber im Einzugsgebiet des Weerbachs die dafür benötigten Eingangsdaten wie Strahlung nicht verfügbar sind, wurden für KAMPUS und HQsim temperaturabhängige Verfahren herangezogen (Blaney-Criddle 1950; Hamon 1963). Aus dem gleichen Grund verwenden KAMPUS und HQsim zur Simulation das Gradtagverfahren (**Box 3.6**). Zum Ausgleich des Messfehlers bei Schneefall wurde in KAMPUS und HQsim ein Schneekorrekturenfaktor kalibriert.

3.3.2. Abflussbildung

Physikalisch basierte Modellgleichungen zur Berechnung der Abflussbildung sollten nur angewendet werden, wenn im Gebiet detaillierte bodenphysikalische Informationen vorliegen (**Box 3.7**). Dies ist beim Weerbach nicht der Fall. Die Modelle verwenden deshalb konzeptionelle Infiltrationsansätze. KAMPUS und HQsim verwenden funktionale Zusammenhänge zwischen simulierter Bodenfeuchte und Abflussbildung (**Box 3.8**), ZEMOKOST verwendet das Konzept der zeitlichen Abflussbeiwertentwicklung.

3.3.3. Abflusskonzentration und Gerinnerouting

Alle Modelle verwenden konzeptionelle Ansätze zur Berechnung von Abflusskonzentration und Gerinnerouting (Box 3.10). In KAMPUS wurde das Gebiet in 11 Teileinzugsgebiete eingeteilt. Der in einer Rasterzelle generierte Abfluss wird mittels einer Transferfunktion zum Auslass jedes Teilgebiets übertragen. Das Gerinnerouting zwischen den Teilgebieten erfolgt mittels einer nicht-linearen Nash-Kaskade. HQsim verwendet zur Berechnung der Abflusskonzentration vom HRU zum Gerinneabschnitt einen linearen Speicheransatz, wobei die Entfernung (und damit die Konzentrationszeit) berücksichtigt wird. Dieser Ansatz wird analog für Oberflächen und Zwischenabflusskomponenten verwendet, wobei diese unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten ansetzen. Für das Gerinnerouting werden die Gerinnesegmente als in Serie verbundene, nicht-lineare Speicher abgebildet, in denen die Fließgeschwindigkeit nach Rickenmann (1996) unter Vorgabe von Parametern zur Neigung und Rauigkeit (d_{90}) berechnet wird. ZEMOKOST verwendet zur Abflussverzögerung in der Fläche die Konzentrationszeit nach Izzard (1946). Zudem kann ebenfalls eine Zwischenabflusskomponente berücksichtigt werden. Für den Abfluss im Gerinne wird die Fließgeschwindigkeit wie in HQsim nach Rickenmann (1996) angesetzt.

4. Wahl der Modellparameterwerte

4.1. Typen von Modellparametern und ihre Messbarkeit

Tab. 4.1 des Regelblatts gibt einen Überblick über die gängigen Modellparameter, die auch für die drei Modelle des Weerbachs relevant sind.

4.2. Vorgangsweise bei der Parameterwahl

Wie in der **Box 4.1** empfohlen, wurden in allen Modellen für die Parameterwahl nicht nur Abflussdaten, sondern auch Informationen über das Abflussverhalten im Gebiet herangezogen (Ergebnisse der Feldkartierungen, z. B. Abb. 8.70). Bei den beiden kontinuierlichen Modellen (KAMPUS und HQsim) wurde eine zeitliche Kalibrierungshierarchie verfolgt, wobei zuerst jährliche und dann saisonale Abflüsse betrachtet wurden. Schließlich wurden die Ereignisganglinien betrachtet. Da der Abfluss des Weerbachs dem nivalen Abflussregime unterliegt (Abb. 8.74), wurden auch Schneedaten (**Box 4.3**) herangezogen. Für ZEMOKOST, das insbesondere für Einzugsgebiete ohne Abflussdaten entwickelt wurde, bekommt die Verwendung von Zusatzinformationen, wie Wasserspiegelmarken oder Dokumentationen von Ausuferungen, besondere Bedeutung (**Box 4.1**).

4.3. A-priori-Parameter

Box 4.4 folgend wurden Feldbegehungen durchgeführt. Das Weerbachgebiet ist mit 72,8 km² allerdings zu groß, um alle relevanten Daten im Zuge von Begehungen zu gewinnen. Dementsprechend wurden Informationen aus Feldbegehungen mit Karten- und Literaturstudien erweitert, und flächendeckend verfügbare Informationen wurden zur Bestimmung der Hydrotope herangezogen (**Box 4.6**). Beispielsweise wurden für ZEMOKOST Oberflächenabflussbeiwerte und Rauigkeiten nach Markart et al. (2004) im Rahmen von Begehungen für relevante Bereiche und Gerinneabschnitte bestimmt. Die entsprechenden Parameterwerte der Hydrotope sind in Abb. 8.70 dargestellt. Der mittlere Abflussbeiwert von 33 % des Weerbachgebiets ergibt sich aufgrund des hohen Anteils an verdichteten Almflächen sowie des Vorhandenseins von Felsflächen mit rascher Abflussreaktion (siehe Abb. 8.77). Dem gegenüber stehen Waldflächen und Hangschutt, die tiefgründige Abflussreaktionen bewirken und niedrige Abflussbeiwerte aufweisen. Die Verteilung der Oberflächenrauigkeitsklassen kann ebenfalls der Abb. 8.70 entnommen werden. Rund 78 % des Gebiets tragen im Ereignisfall mit Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss (Interflow) zur Abflussentstehung bei. Die Zonen mit Zwischenabfluss und tiefgründigem Abfluss wurden anhand der hydrogeologischen Karte (Abb. 8.68b) bestimmt.



Abb. 8.77 Einzugsgebiet Weerbach. Links: verdichtete Weiderasen („Viehgangln“, Bildaufnahme: 09.06.2009, B. Kohl), rechts: steile felsdurchsetzte Talflanke. Hochgelegene Senken können bis in die Sommermonate schneebedeckt bleiben (Bildaufnahme: 01.07.2012, J. Schöber)

Die Wahl der Parameter des KAMPUS-Modells erfolgte manuell in Anlehnung an den von Reszler et al. (2006) vorgeschlagenen Ansatz zur Identifikation von dominanten Prozessen. Dabei wurden die bereits beschriebenen Feldbegehungsdaten und Gebietskenntnisse ver-

wendet (**Box 4.4**). Die Einteilung in unterschiedliche Hydrotopklassen (Abb. 8.68a) wurde für die Wahl der Parameter der oberen Bodenspeicher, welche den oberflächlichen Abfluss und den Interflow bestimmen, verwendet. Parameter im Modell sind hierbei z. B. die Speicherkonstante des Bodenspeichers und die Speicherfüllung, bei deren Überschreitung es zu schnellem oberflächlichen Abfluss kommt. Für Pixel, welche beispielsweise dem Hydrotop Wald zugewiesen wurden, wurde ein hohes Speichervermögen und ein geringer oberflächlicher Abfluss angenommen, d. h., für die Speicherkonstante und die Speicherfüllung wurden hohe Werte gewählt. Auf versiegelten Flächen kommt es im Gegensatz dazu schnell zu oberflächlichem Abfluss, sodass Speicherkonstante und Speicherfüllung sehr niedrig angesetzt wurden. Die Wahl der Parameter der Grundwasserspeicher des Modells erfolgte auf Basis der hydrogeologischen Abflussprozesskarte (Abb. 8.68b). Diese Karte stellt eine wertvolle Information über die Rückhalte- und Speicherpotenziale des Einzugsgebietes dar und liefert Informationen darüber, in welcher Tiefe die Abflussprozesse stattfinden. Ein Parameter im Modell ist z. B. die Perkulationsrate aus dem Bodenspeicher in die Grundwasserspeicher. Für Flächen mit tiefgründigem Abfluss wurde eine hohe Perkulationsrate in den Untergrund angenommen, sodass sich ein tiefgründiger Grundwasserabfluss ausbilden kann, während auf Flächen mit Oberflächenabfluss auf Fels quasi keine tiefgründige Perkulation stattfindet und somit eine sehr geringe Perkulation in den Untergrund angenommen wurde. Die Schneeschmelzparameter des Gradtagverfahrens wurden zunächst gleichmäßig für das Gebiet angenommen und dann im zweiten Schritt unter besonderer Berücksichtigung des Schmelzwasserabflusses im Frühjahr angepasst. Für die Abflusskonzentration und den Wellenablauf im Gerinne wurde eine Voranalyse durchgeführt und aus den gemessenen Niederschlags- und Abflussereignissen eine ungefähre Konzentrationszeit des Gebietes abgeschätzt. Die Parameter wurden dementsprechend angesetzt (**Box 4.5**). Die Parameter für den oberflächlichen Abfluss, Interflow und Grundwasserabfluss wurden zunächst a priori durch Experteneinschätzung auf Grundlage aller zur Verfügung stehenden Informationen gewählt.

Für die Modellierung des Weerbachs mit HQsim wurden entsprechend **Box 4.6** auf Basis von topografischer Information aus dem digitalen Geländemodell (z. B. Höhe, Exposition und Neigung) und einer Bodenkarte die Hydrotope abgeleitet (Abb. 8.69). Der Blattflächenindex und der Grad der Versiegelung wurden auf Basis der Landbedeckung (CORINE-Karte) und Experteneinschätzung zugewiesen. In Anlehnung an die Bodenkarte des Hydrologischen Atlas Österreich wurden für die vier Bodentypen im Weerbachgebiet (Abb. 8.69) Wertebereiche zum Bodenwassergehalt, der Leitfähigkeit des Bodens und in Verbindung mit Pedotransferfunktionen funktionale Zusammenhänge zwischen Wassergehalt und Leitfähigkeit abgeschätzt. Daneben wurden A-priori-Wertebereiche zur Parametrisierung der Zwischenabflussbildung nach Mualem-van Genuchten festgelegt (AD-HOC-Arbeitsgruppe Boden 2005). Wie in **Box 4.6** beschrieben sind solche Informationen nicht auf Einzugsgebietsebene repräsentativ, weshalb eine Kalibrierung sinnvoll ist (siehe unten). In HQsim ist die Bodenmächtigkeit ein sensibler Parameter in der Kalibrierung der Abflussbildung (Achleitner et al. 2009). Die A-priori-Bandbreiten der Bodenmächtigkeit wurden deshalb in Abhängigkeit von der Neigung (abgeleitet aus dem DGM) vordefiniert (flach = mächtig, steil = gering mächtig). Zur Beschreibung des tiefgründigen Abflusses wurden Linearspeicher nachgeschaltet, wobei ein zu kalibrierender Faktor den Anteil an lateralem Zwischenabfluss und lateraler Tiefenversickerung steuert. Entsprechende A-priori-Parameter basierten auf Modelliererfahrungen mit HQsim in geologisch/klimatologisch vergleichbaren Gebieten in Tirol (z. B. Wattenbach, Abb. 8.74). Für relevante Schneeparameter (z. B. Gradtagfaktoren, Übergang von Regen auf Schnee) wurden A-priori-Werte aus der Literatur verwendet (z. B. Krajčič et al. 2017; Helfricht et al. 2018).

4.4. Parameterkalibrierung am Abfluss

Die Kalibrierung des KAMPUS-Modells am Weerbach erfolgte manuell, als Kalibrierungszeitraum wurden die Jahre 2000 bis 2007 gewählt. Gemäß **Box 4.7** wurde ein Teil der Abflussdaten für die Validierung aufgehoben und die A-priori-Parameter als Startwerte für die ersten Kalibrierungsschritte verwendet. Bei der Kalibrierung wurde eine zeitliche Hierarchie verfolgt, wodurch eine Verringerung der Anzahl der jeweils zu kalibrierenden Parameter auf ein überschaubares Maß erreicht wurde (siehe **Box 4.3**). Somit erfolgte zuerst eine manuel-

le Kalibrierung anhand von Daten auf saisonaler Skale und danach eine Feinjustierung mit Ereignisdaten. Ziel des ersten Kalibrierungsschrittes auf saisonaler Skale war eine möglichst präzise Wiedergabe der Wasserbilanz und der Abflusssdynamik des Gebietes (nivales Abflussregime, Abb. 8.74). Hierbei wurde die Form der simulierten Ganglinien beurteilt, wobei besonders die Neigung der Auslauflinie beachtet wurde (**Box 4.8**). Dementsprechend wurden bei der Kalibrierung von KAMPUS zunächst die Parameter, die den Grundwasserabfluss bestimmen, und die Bodenspeicher kalibriert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Information über die Speicherfähigkeit der unterschiedlichen Abflussklassen aus der hydrogeologischen Abflussprozesskarte (Abb. 8.68) im Modell erhalten bleibt. Konkret heißt das, dass für Flächen mit tiefgründigem Abfluss die Speicherkonstanten und die Perkolationsraten in den tiefen Grundwasserspeicher innerhalb von hohen Wertebereichen variiert wurden. Im Vergleich dazu wurden Flächen mit Interflow, die keine Tiefenversickerung aufweisen, aus niedrigeren Wertebereichen geeignete Parameter gewählt. Weiters wurden in diesem Kalibrierungsschritt die Parameter des Gradtagverfahrens kalibriert, die die Schneeschmelze bestimmen. Außerdem erfolgte auch eine erste Kalibrierung der Parameter für den oberflächlichen Abfluss, welche im zweiten Kalibrierungsschritt auf Ereignisskale noch feinjustiert wurden. Abb. 8.78 zeigt das Simulationsergebnis auf saisonaler Skale für den Zeitraum April bis Oktober 2004. Die Abflusssdynamik wird, abgesehen von einer Überschätzung der Schneeschmelze im Frühjahr, sehr gut wiedergegeben. In **Box 4.8** wird empfohlen, für Vergleichszwecke mit anderen Studien das Gütemaß nach Nash-Sutcliffe (NSE) zu verwenden. Für den gesamten Beobachtungs- und Simulationszeitraum wurde ein NSE von 0.85 erzielt.

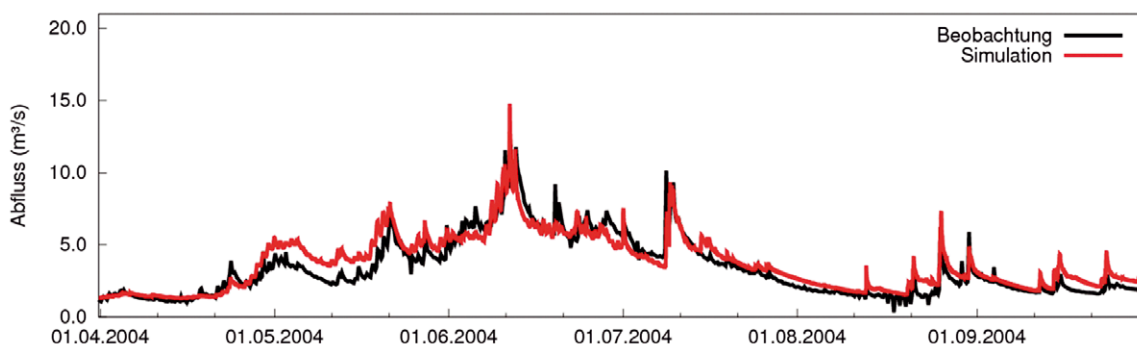


Abb. 8.78 Simulationsergebnisse auf saisonaler Skale für den Zeitraum April bis Oktober 2004 (Modell KAMPUS)

Auf der Ereignisskale wurden zunächst die fünf größten Hochwässer der Beobachtungszeitreihe identifiziert. Besonderes Augenmerk bei der Kalibrierung wurde auf das letzte große Hochwasserereignis im Jahr 2005 gelegt. Bei diesem Kalibrierungsschritt wurden in erster Linie die Parameter feinjustiert, die den schnellen Oberflächenabfluss bestimmen, um eine möglichst gute Wiedergabe der Hochwasserereignisse zu erzielen. Abb. 8.79 zeigt das Simulationsergebnis des Hochwasserereignisses von 2005, das mit dem Modell sehr gut erfasst wird.

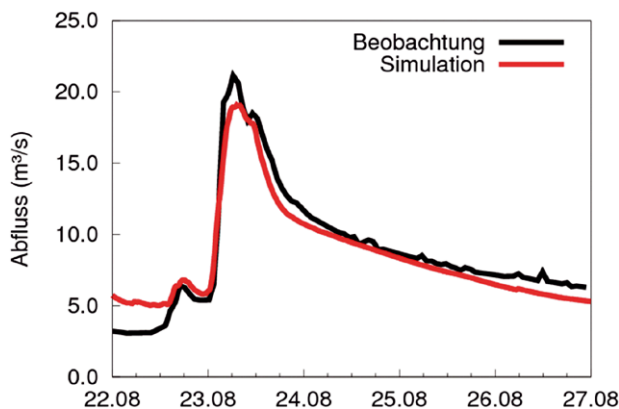


Abb. 8.79 Simulationsergebnis für das Hochwasserereignis 2005 (Modell KAMPUS)

Das HQsim-Modell wurde automatisiert kalibriert. Dazu wurde ein globaler Optimierungsalgorithmus verwendet, in diesem Fall eine Spezialform der Markov-Chain Monte-Carlo-Simulation (Simulated Annealing, in Anlehnung an Andrieu 2003). Gemäß **Box 4.7** wurden vor der automatisierten Kalibrierung für einzelne Modellparameter A-priori-Wertebereiche definiert, die im Zuge von insgesamt 20.000 Rechenläufen optimiert wurden. Gemäß **Box 4.8** ist für automatische Kalibrierungen das Nash-Sutcliffe-Gütemaß NSE und zur Beurteilung der Wasserbilanz der BIAS geeignet. Deshalb wurden beide Gütemaße für diese automatisierte Kalibrierungen kombiniert in Form von

$$Z_Q = (1 - NSE) + w \cdot RBIAS \quad (\text{Gl. 1})$$

wobei sich ein Gewicht $w = 0,1$ als geeignet erwiesen hat (Lindström et al. 1997; Parajka et al. 2007).

Gemäß **Box 4.10** ist bei einer automatisierten Kalibrierung eine Zielfunktion (ZF) mit der Fragestellung abzustimmen. Da es sich bei HQsim im vorliegenden Fall um ein Modell zur Hochwasserprognose handelt, wurden Daten hoher Abflüsse in die Kalibrierung einbezogen. Aufgrund des kontinuierlichen Modelleinsatzes müssen jedoch auch Nieder- und Mittelwasserverhältnisse einbezogen werden (**Box 4.3**; zeitliche Kalibrierungshierarchie). Schöber (2014) bewertete die Modellergebnisse von Hochwasserereignisabflüssen zusammen mit saisonalen Abflüssen in der Schmelzperiode in Form einer gewichteten Zielfunktion. Für die Kalibrierung von HQsim wurde dieses Vorgehen wie folgt angepasst: Die Schneeschmelzperiode (Z_{SM}) wurde nach Auswertung der Ganglinien auf den Zeitraum 01.04. bis 30.06. festgelegt. Eine große Zahl an mittleren Hochwasserereignissen ereignete sich in diesem Zeitraum. Die größten Hochwässer ereigneten sich jedoch in den Sommermonaten zufolge lang anhaltender Niederschläge ohne wesentliche Beteiligung von Schneeschmelze (siehe auch Merz und Blöschl 2003). Entsprechend Abb. 8.75b treten Jahreshochwässer im Zeitraum 01.05. bis 31.08. auf. Diese Periode wurde in der Zielfunktion der Kalibrierung (Z_{Saison}) zusätzlich zur Schneeschmelzperiode berücksichtigt. Für die Anwendung im Hochwasserprognosesystem ist zudem die Modellgüte während seltener Hochwasserereignisse von Interesse, sodass entsprechende Daten ebenfalls in die Zielfunktion aufgenommen wurden (Z_{HQ}). Als Grenzwert für ein Hochwasserereignis wurde der Median der Jahreshochwasserserie festgelegt. Die Gewichte a , b und c der Zielfunktion Gl. 2 wurden variiert. Es zeigte sich, dass trotz der Hochwasseranwendung das Gewicht c (Hochwasserereignisse) nicht zu hoch gewählt werden sollte, da dies in Nieder- und Mittelwasserperioden zu einem Überschätzen der Simulationen führen kann.

$$ZF = a \cdot Z_{SM} + b \cdot Z_{Saison} + c \cdot Z_{HQ} \quad (\text{Gl. 2})$$

Um die aktuellen Gegebenheiten im Einzugsgebiet möglichst gut zu berücksichtigen und aus Gründen der Performance (20.000 Rechenläufe), wurden als Simulationszeitraum die Jahre 2000 bis 2015 (Kalibrierung: 2000 bis 2009 / Validierung: 2010 bis 2015) festgelegt. Zur Auswahl geeigneter Hochwasserereignisse während des Kalibrierzeitraumes wurde dessen $MJHQ$ als Grenzwert herangezogen (12.9 m³/s). Insgesamt wurden 6 Ereignisse mit einem Spitzenabfluss größer bzw. gleich dem $MJHQ$ identifiziert und zur Kalibrierung der Parameter für die Abflussbildung im Hochwasserfall herangezogen. Für die Zielfunktion wurde pro Rechenlauf für Z_{HQ} der Median aus den 6 Ereignissen berechnet. Für Z_{SM} und Z_{Saison} wurde ebenfalls der Medianwert der einzelnen Jahre für jeden einzelnen Rechenlauf berechnet und in die Zielfunktion eingesetzt.

Von den 20.000 Ergebnissen der automatisierten Kalibrierung wurden der „best-fit“ (Simulation in Abb. 8.80 und Abb. 8.81) und das 90-%-Modellintervall visuell beurteilt und plausibilisiert (**Box 4.8**). Aus der Bandbreite aller Simulationsergebnisse wurden die besten 10 % zufolge des Kalibrieralgorithmus als relevante Ergebnisse gewählt. Davon wurde für jeden Zeitschritt das 90-%-Modellintervall aus dem 5- bzw. 95-Quantil erzeugt. Für den Abfluss auf saisonaler Skala (Abb. 8.80, oben), in der Schneeschmelzperiode (Abb. 8.80, unten) und für das Hochwasserereignis im Jahr 2005 (Abb. 8.81) ergaben sich zufriedenstellende Ergebnisse.

Der als „Simulation“ dargestellte „best-fit“ der Zielfunktion (Gl. 2) weist die Gewichtung $a = 0,4$, $b = 0,4$ und $c = 0,2$ auf. Somit liegt mehr Gewicht auf dem „längerfristigen“ Abflussverhalten. Die Parameterunsicherheit wird durch die teilweise große Varianz zwischen den verschiedenen Parametrisierungen (dargestellt durch das 90%-Modellintervall) verdeutlicht. NSE-Werte des 90%-Modellintervalls liegen für die gesamte Kalibrierungsperiode zwischen 0,74 und 0,85. Allerdings unterschätzt die „Simulation“ mit stärkerer Gewichtung der saisonalen Zeiträume den Hochwasserabfluss des größten Ereignisses im Jahr 2005 deutlich (Abb. 8.81). Eine weitere Optimierung mit einer stärkeren Gewichtung des Hochwasserabflusses (= Ereignisoptimierung) führte zwar zu einer sehr zufriedenstellenden Hochwassersimulation, überschätzte aber die gemessenen Abflüsse auf der saisonalen Skale teilweise stark.

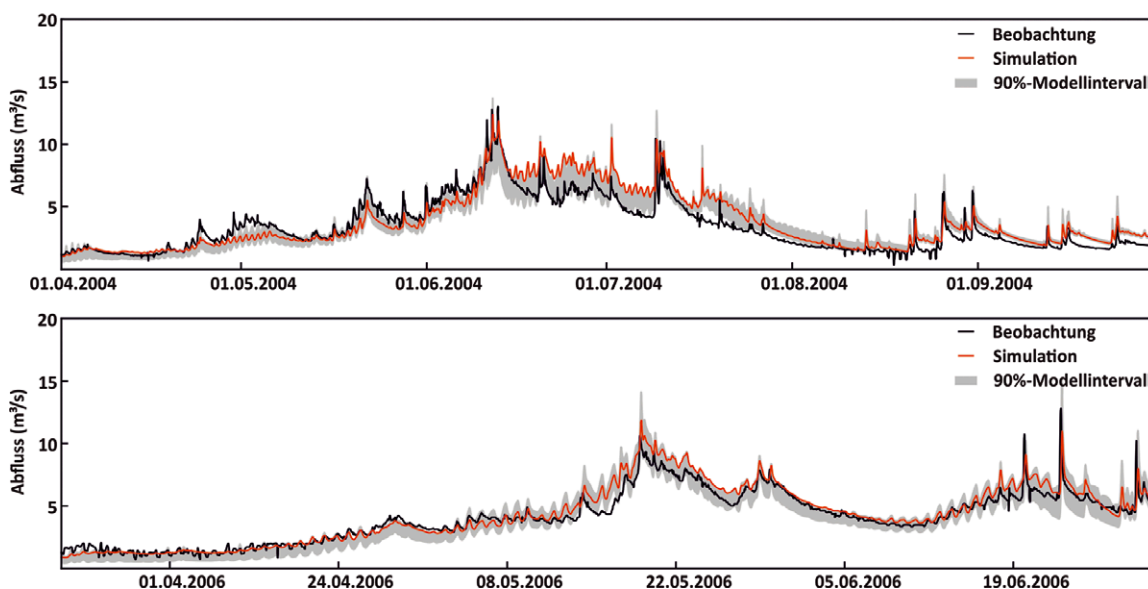


Abb. 8.80 Oben: Simulationsergebnisse auf saisonaler Skale für den Zeitraum April bis Oktober 2004, unten: Schneeschmelzperiode (April bis Juni) des Jahres 2006 (HQsim). Das 90%-Modellintervall resultiert aus der Parameterunsicherheit

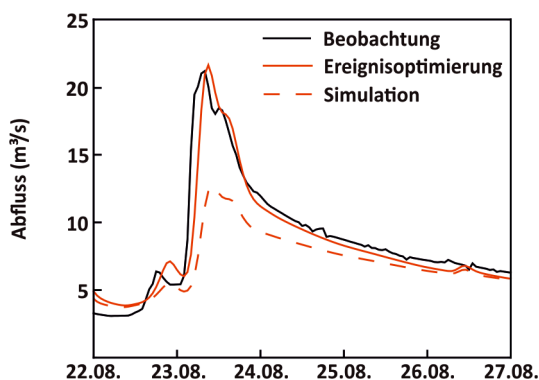


Abb. 8.81 Simulationsergebnis für das Hochwasserereignis 2005 (HQsim). Ereignisoptimierung: Optimierung der Zielfunktion nur für dieses Ereignis, Simulation: Optimierung der Zielfunktion für die gesamte Zeitreihe

4.5. Parameter für Gebiete ohne Abflussdaten

ZEMOKOST wurde eigentlich für die Berechnung von Hochwasserabflüssen kleiner, unbeobachteter Wildbacheinzugsgebiete konzipiert. Deshalb wurden Parameterwerte nicht kalibriert, sondern wie in einem unbeobachteten Einzugsgebiet ermittelt (siehe Abb. 8.70). Als Ausnahme wurden zwei Modellparameter, Grenzwert der Kornverteilung im Gerinne (D_{90}) und der Zwischenabflussfaktor über den Vergleich der modellierten Fließgeschwindigkeiten mit Naturbeobachtungen grob kalibriert. Die Ergebnisse werden später plausibilisiert.

5. Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung

5.1. Modellvalidierung an Abflussdaten

Im Allgemeinen wird eine Validierung anhand von Abflussdaten eines von der Kalibrierung unabhängigen Datenzeitraums durchgeführt (**Box 5.1**). Die Simulationsergebnisse von KAMPUS wurden durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Beobachtungsdaten für den gewählten Validierungszeitraum 1983 bis 1999 validiert. Dabei wurde gemäß (**Box 5.2**) darauf geachtet, dass die Wasserbilanz, die zeitliche Abflusssdynamik und einzelne Ereignisse vom Modell gut erfasst werden. Aus diesem Grund wurden Ergebnisse auf saisonaler Skala und auf Ereignisskala analysiert. Als Beispiel sind in Abb. 8.82 die Simulationsergebnisse auf saisonaler Skala für April bis Oktober 1991 dargestellt.

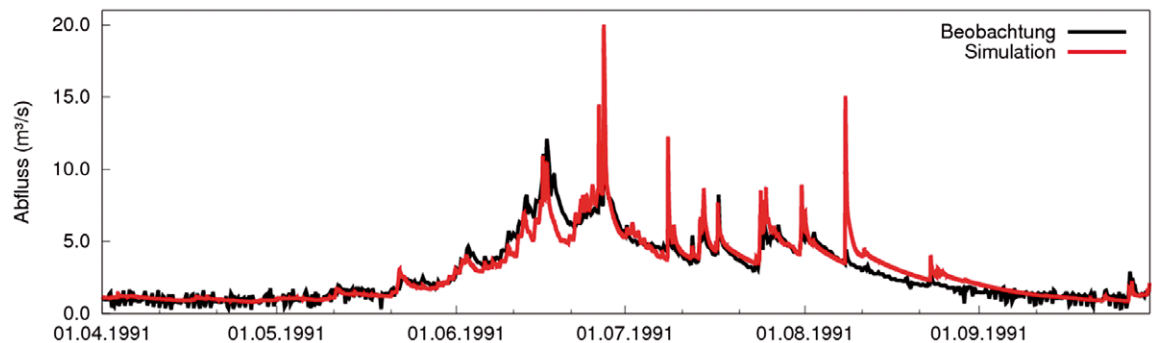


Abb. 8.82 Validierung: Simulationsergebnisse April bis Oktober 1991 (KAMPUS)

Die Validierung der Simulationsergebnisse von HQsim erfolgte anhand aktueller Daten der hydrologischen Jahre 2010/11 bis 2014/15. Das Ergebnis einer automatisierten Kalibrierung sind in der Regel mehrere Parametersätze, deren Simulationen eine ähnliche Güte in der Zielfunktion erreichen. Daher hat die Validierung mit dem Split-Sample-Test eine besonders hohe Bedeutung. Zudem ist es wichtig, die Werte der wichtigsten Modellparameter auf ihre hydrologische Plausibilität zu prüfen.

Von den Monte-Carlo-Simulationen mit HQsim am Weerbach wurden die besten 10 % aller Rechenläufe (aus denen das 90%-Modellintervall gebildet wurde, siehe Abb. 8.80) validiert. Im Rahmen der Validierung wurde die Simulationsgüte dieser Parametersätze anhand der Hochwasserereignisse im Validierungszeitraum überprüft. Die Ergebnisse sind weitgehend zufriedenstellend. Abweichungen beim Hochwasser im Jahr 2012 wurden im Rahmen einer Plausibilisierung analysiert (siehe unten). Weiters wurden für diese Parametersätze die Wasserbilanzen und saisonalen Abflusscharakteristiken verglichen. Der NSE der letztendlich gewählten Parametrisierung (Ergebnisse dargestellt in Abb. 8.83 und Abb. 8.84) liegt für den Abfluss in der Validierungsperiode bei 0,74 und damit im unteren Bereich der entsprechenden Ergebnisse der Kalibrierungsperiode.



Abb. 8.83 Validierung: Simulationsergebnisse für die Schneeschmelzperiode April bis Juni 2012 (HQsim)

Der Empfehlung von **Box 5.1** folgend wurde HQsim anhand zusätzlicher Daten plausibilisiert. Dabei wurden Perioden mit auffälligen Modellabweichungen speziell betrachtet (**Box 5.2**). In Abb. 8.83 ist der gemessene Abfluss und die entsprechende Simulation in der Schneeschmelzperiode des Jahres 2012 dargestellt. Bis auf leichte Abweichungen beim Einsetzen der Schneeschmelze (Ende April/Anfang Mai) wird die Periode von Anfang April bis Ende Mai durch das Modell gut wiedergegeben. Die Schneesimulation wurde mittels MODIS-Schneebedeckungskarten zusätzlich überprüft (siehe z. B. Bellinger et al. 2012; Nester et al. 2012). Abb. 8.84 stellt diese Schneekarte (linkes Bild) der Simulation mit HQsim (rechtes Bild) gegenüber. Die MODIS-Schneekarte weist die Klassen „schneefrei“ und „Schnee im Wald“ auf. Die Schneebedeckung im Gebiet über der Waldgrenze wird in Form mehrerer Klassen des relativen Anteils der schneebedeckten Fläche in den MODIS-Pixeln dargestellt. Ein hoher Wert dieser „snow covered fraction“ entspricht einer durchgehenden Schneebedeckung. Die modellierte schneebedeckte Fläche wird zum Vergleich in Klassen des Schneewasseräquivalents dargestellt. Bereits ein qualitativer optischer Vergleich der MODIS-Daten mit dem simulierten Schneeausaperungsmuster zeigt eine gute Übereinstimmung. In den Bereichen über der Waldgrenze wird durch das Modell durchwegs noch eine Schneedecke mit mehr als 250 mm Wasseräquivalent berechnet. Die gute Übereinstimmung zeigt die Plausibilität der Parameter zur Schneemodellierung. Dies wird durch den Vergleich der Abflussganglinien im April und Mai bestätigt (Abb. 8.83). Quantitative Methoden zur Bewertung von Schneeflächendaten, die für die Kalibrierung und Validierung von HQsim im Weerbachgebiet verwendet wurden, sind Bellinger (2015) zu entnehmen.

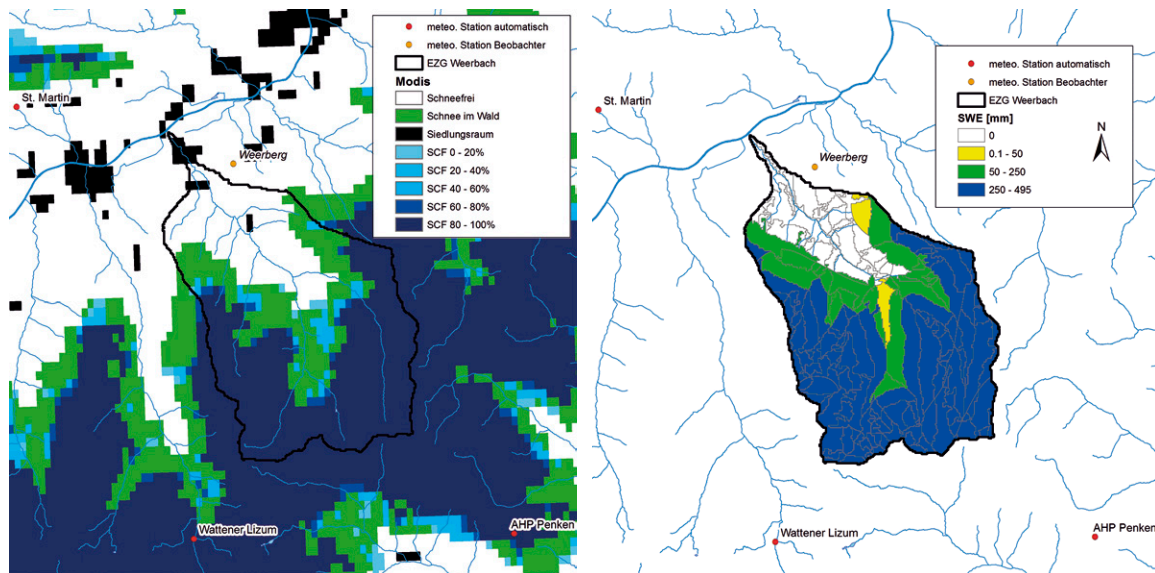


Abb. 8.84 Schneebedeckung im Weerbachgebiet am 28.04.2012. Links: MODIS-Schneekarte (daily_FSC_Alps_Optical, Quelle: CryoLand), SCF = snow covered fraction [%], entspricht dem Anteil der schneebedeckten Fläche in einem MODIS-Pixel, rechts: mit HQsim simulierte Schneeverteilung (Schneewasseräquivalent in [mm]) in den HRU-Flächen des Modells

Das Hochwasserereignis vom 04.06.2012 wird vom Modell jedoch recht deutlich unterschätzt (Abb. 8.83). Bei dem Ereignis handelt es sich um ein Hochwasser in der Größenordnung von HQ_{10} . Es ereignete sich als Kombination aus Niederschlag und Schneeschmelze während der Tage vor dem Ereignis. Da in der operationellen Hochwasserprognose nur Daten automatischer Wetterstationen verfügbar sind, wurden ausschließlich diese für die Modellierungen mit HQsim verwendet. Als Zusatzinformation stehen für die Plausibilisierung Daten von Beobachterstationen zur Verfügung. Abb. 8.85 stellt die Niederschlagstagesummen des Ombrometers der Station Weerberg sowie die flächig interpolierten Niederschläge der automatischen Wetterstationen für die Tage vor und nach dem Hochwasser gegenüber. Am 03.06.2012 lag die Tagessumme des interpolierten Gebietsniederschlags (37,5 mm) deutlich unter der Tagessumme der Station Weerberg (51 mm). Wie in **Box 2.8** beschrieben, können bei interpolierten Niederschlägen die Intensitätsspitzen unterschätzt werden. Zudem wurde bei diesem Beispiel auch nicht der Einfluss der Seehöhe in die Interpolation miteinbezogen. Unter der Annahme,

dass die Niederschlagssumme mit der Höhe zunimmt, sollten die Tagessummen des Gebietsniederschlags sogar größer sein als die Tagessummen der relativ tief liegenden Station Weerberg (siehe auch Abb. 8.71). Aus diesem Grund kann man die Abweichung des simulierten Abflusses am 04.06.2012 auch auf die Unsicherheit der Niederschlagsdaten zurückführen.

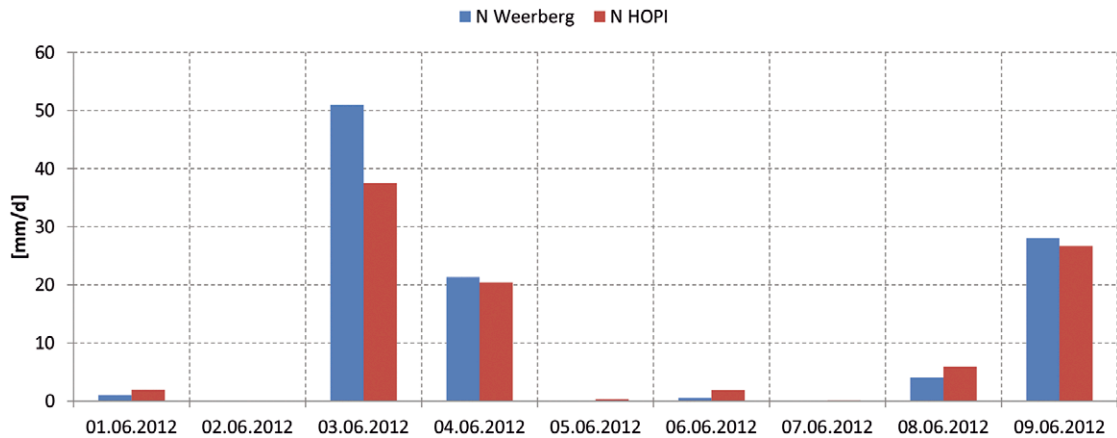


Abb. 8.85 Vergleich der Niederschlagsdaten des Ombrometers Weerberg (blau) und des flächig interpolierten Niederschlags der automatischen Wetterstationen (rot) des Hochwasserprognosemodells HoPI

5.2. Plausibilisierung von Modellen in unbeobachteten Einzugsgebieten

Im Synthesebeispiel Weerbach wurde das Modell ZEMOKOST mit der Annahme eingesetzt, es gäbe keinen Pegel im Einzugsgebiet. Die Plausibilisierung erfolgte nicht für aufgetretene Ereignisse (**Box 5.4**), sondern für den Zielwert HQ_{100} .

5.3. Spezielle Aspekte bei Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit (HQ_n)

5.3.1. Grundsätzliche Vorgangsweise

Das Projekt HOWATI hatte eine Harmonisierung der Methoden der Wildbachverbauung und des Flussbaus zum Ziel. Dabei kamen unterschiedliche Modellierungsansätze zum Einsatz die in Tab. 8.42 zusammengefasst werden. Die Modellierung zur Bestimmung des HQ_{100} mit ZEMOKOST erfolgte in Form von Ereignissimulationen. Als Input wurden Bemessungsniederschläge verwendet. Zur Bestimmung der Jährlichkeit wurden die jeweiligen Ergebnisse mit der Pegelstatistik im Gebiet und mit hydrologisch ähnlichen Gebieten verglichen. Demgegenüber wurden mit KAMPUS 10.000 Jahre Abflüsse simuliert (10.000 Möglichkeiten des jetzigen Zustands) und daraus eine Hochwasserstatistik erstellt. Die Niederschläge wurden für die Langzeitsimulation mithilfe eines Niederschlagsmodells generiert, während als Temperaturinput die gemessenen Temperaturdaten fortlaufend wiederholt wurden. Im Vergleich zu der Ereignismodellierung mit ZEMOKOST hat diese Langzeitsimulation den Vorteil, dass sie nicht auf der Annahme beruht, dass die Jährlichkeit des Bemessungsniederschlags gleich der Jährlichkeit des Bemessungshochwassers ist und die Vorbefeuchtung realistisch simuliert werden kann. Der Nachteil der Langzeitsimulation ist die deutlich höhere Komplexität.

Tab. 8.42 Zusammenfassung der vorgestellten Modellansätze zur Bestimmung des HQ_{100} am Weerbach

	Modelltyp	Eingangsgrößen und Parameter
ZEMOKOST	Ereignismodell	Jährlichkeit des Bemessungsniederschlags entspricht Jährlichkeit des Abflusses verschiedene Niederschlagsdauern werden untersucht Modellparameter werden aus Begehungen und Kartierungen abgeleitet
KAMPUS	Wasserhaushaltsmodell	Niederschlagsmodell Langzeitsimulation von 10.000 Jahren statistische Auswertung der simulierten Hochwasserscheitel zur Bestimmung der gewünschten Jährlichkeit

5.3.2. Wahl der Eingangsgrößen und deren Jährlichkeit

(a) Eingangsgrößen – Niederschlagsdauer

Wie in **Box 5.5** empfohlen, wurden für die Ereignismodellierungen mit ZEMOKOST alle Niederschlagsdauerstufen von eHYD verwendet und die daraus resultierende Schar von Hochwasserwellen bezüglich des maximalen Abflussscheitels ausgewertet. Zur Erstellung des Niederschlagsinputs für die Monte-Carlo-Simulationen mit KAMPUS wurde ein stochastisches Niederschlagsmodell erstellt, dessen Parameter an lange Zeitreihen des Niederschlags der Station Wattener Lizum angepasst wurden (siehe Kapitel 2.2.3. dieses Synthesebeispiels).

(b) Wahl der Jährlichkeit des Bemessungsniederschlags

Für die Modellierung mit ZEMOKOST wurden die Regenspendenlinien des gewichteten Bemessungsniederschlags mit der Jährlichkeit N_{100} von eHYD verwendet. Die Vorgehensweise zur Flächenabminderung ist in Kapitel 2.2.3. dieses Synthesebeispiels beschrieben. Wie in **Box 5.6** empfohlen, wurden die Eingangsgrößen und die Modellparameter der Ereignismodellierung aufeinander abgestimmt, d. h., bei der Verwendung der Bemessungsniederschläge der Jährlichkeit N_{100} wurden die Modellparameter und Startwerte der Modellierung entsprechend Markart et al. (2004) und den Erfahrungen aus einer Vielzahl von Beregnungsversuchen ungünstig, aber plausibel gewählt. Der simulierte Abflussscheitel liegt somit im oberen Bereich der gesuchten Abflussjährlichkeit $n = 100$ (Kohl 2011).

5.3.3. Wahl der HQ_n -spezifischen Modellparameter

Für den Weerbach liegen hochwertige Abflussdaten ab 1971 vor. Mit einer Reihenlänge von > 40 Jahren ist daraus die Abschätzung des HQ_{100} -Werts möglich. Im DWA-Merkblatt „Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten“ (DWA 2012) wird darauf hingewiesen, dass die gesuchte Jährlichkeit nicht das Dreifache der Reihenlänge überschreiten soll. In Abb. 8.86 ist die hochwasserstatistische Abschätzung für den Weerbach nach der Verteilungsfunktion GEV-LM für Daten der Periode 1971 bis 2015 (Quelle eHYD) dargestellt, wonach der Konfidenzbereich zwischen 22 und 50 m³/s liegt. Andere 2- und 3-parametrische Funktionen (nicht dargestellt) ergeben Schätzwerte für das HQ_{100} zwischen 28 und 32 m³/s. Aufgrund dieses Unsicherheitsbereichs wird die in **Box 5.7** empfohlene Methode der Kalibrierung eines N-A-Modells anhand repräsentativer Ereignisse aus der Pegelreihe für die Modellierung mit KAMPUS bevorzugt. Die Wahl der Modellparameter wird somit nicht in Zusammenschau mit den Werten der Hochwasserstatistik getroffen.

Wie eingangs beschrieben wird für die Modellierung mit ZEMOKOST davon ausgegangen, dass keine Abflussdaten vorhanden sind. Somit werden, ebenfalls **Box 5.7** folgend, die Modellparameter für ZEMOKOST a priori anhand der Erkenntnisse aus Feldbegehungen und Kartierungen bestimmt.

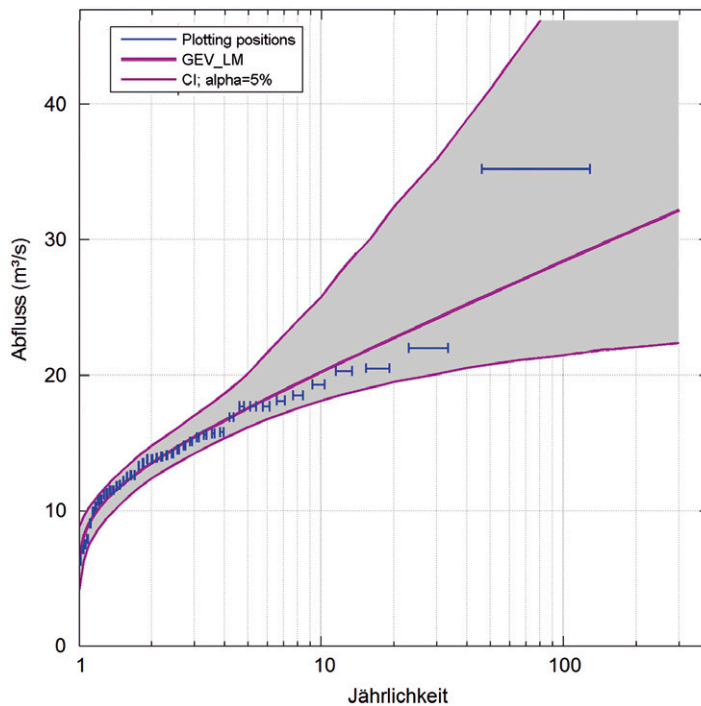


Abb. 8.86 Hochwasserstatistik Pegel Weer (72,8 km²), Zeitraum 1971 bis 2015, Verteilungsfunktion GEV mit L-Momenten. Konfidenzbereich (Signifikanzniveau 5 %) mittels Bootstrapping

In die Kalibrierung und Validierung von KAMPUS am Weerbach wurden die großen beobachteten Abflussereignisse einbezogen (**Box 5.9**). Deshalb wurde im Zuge der Plausibilisierung die beobachtete Hochwasserserie mit den entsprechenden Simulationsergebnissen verglichen (Abb. 8.87). Das Ergebnis zeigt, dass die Hochwasserstatistik mit dem Modell sehr gut wiedergegeben werden kann. Nur das größte Ereignis (1985) wird vom Modell aufgrund von unsicheren Niederschlagsdaten unterschätzt.

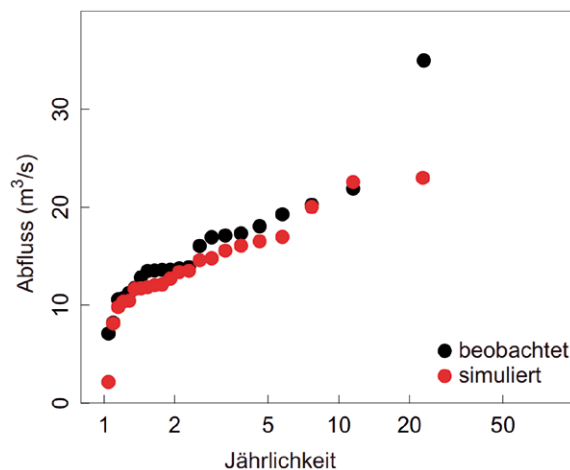


Abb. 8.87 Vergleich der Hochwasserstatistik aus Beobachtungsdaten und Simulationsergebnissen (Roger et al. 2012b)

Die Modellparameter für die Ereignismodellierung mit ZEMOKOST wurden anhand von Prozessinformationen aus Gebietsbegehungen bestimmt (**Box 5.10**). Die entsprechende Vorgehensweise ist in Abschnitt 2.1. dieses Synthesebeispiels beschrieben. Abb. 8.88 zeigt die Simulationen mittels ZEMOKOST. Der mit der Dauerstufe D = 74 Minuten simulierte Scheitelwert mit dem 100-jährlichen Bemessungsniederschlag beträgt 61 m^3/s .

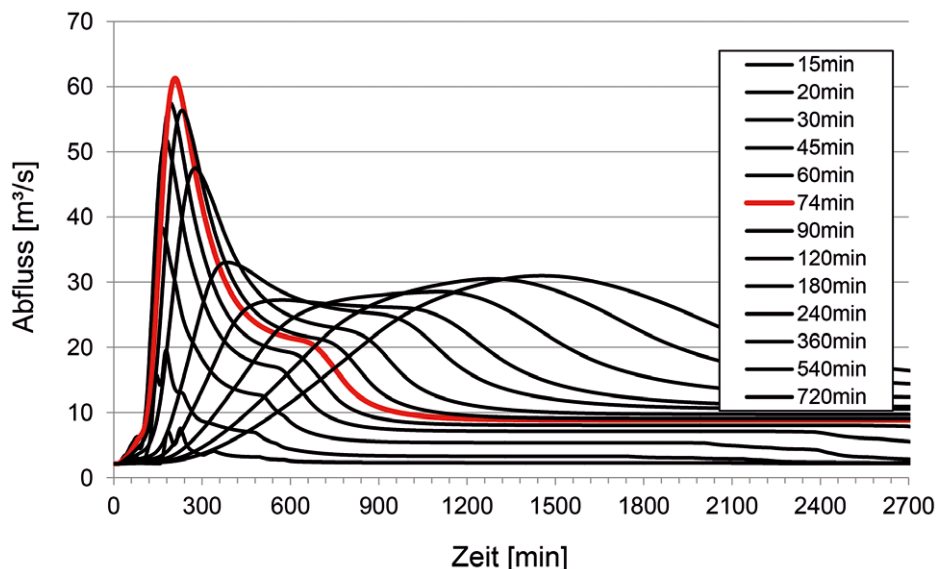


Abb. 8.88 Simulationen für den hundertjährigen Niederschlag (N_{100}) mit unterschiedlichen Dauerstufen mittels ZEMOKOST

Gemäß **Box 5.10** wurden die Modellparameter des Modells ZEMOKOST für das HQ_{100} und der simulierte Wert des HQ_{100} selbst mittels Prozessinformationen plausibilisiert. Da für ZEMOKOST angenommen wird, dass im Gebiet des Weerbachs keine Abflussdaten vorliegen, kommt der nachfolgend gezeigten Mehrfachstrategie zur Plausibilisierung eines Hochwasserwartungswertes mittels unterschiedlicher Indikatoren (Chronik, Nachrechnung dokumentierter Ereignisse, „stumme Zeugen“, Nachrechnung beobachteter Anschlaglinien, Vergleich mit empirischen Faustformeln) eine große Bedeutung zu.

Beurteilung der Bachcharakteristik, Bewertung von „stummen Zeugen“, Analyse, Einbeziehung der Ereignischronik und Aussagen der ortsansässigen Bevölkerung: Am Weerbach zeigt vor allem die ältere Chronik häufiges Auftreten von Hochwässern, ausgelöst durch heftige Sommergewitter in Kombination mit zahlreichen Murgängen. In den letzten Dekaden waren zwei Hochwasserereignisse auf intensive Dauerregen zurückzuführen (Tab. 8.43). Für die Bemessung sind demnach kritische Regenereignisse kurzer Dauerstufe (im Bereich 1 bis 2 Stunden) nicht auszuschließen und können aus der Chronik durchaus als plausibel angesehen werden.

Tab. 8.43 Wildbachchronik Weerbach (WLV Wildbachaufnahmeblatt, Hochreiter 2004)

1945	Hochwasser mit Geschiebe, viele Muren, 3 Gebäude beschädigt heftige Gewitterregen (16.07.1945, 22.07.1945)
1959	Hochwasser mit geringen Schäden (14.06.1959)
1965	Hochwasser mit Geschiebe, viele Muren, Wege und Straßen beschädigt heftige Gewitterregen (27.07.1965)
1966	Hochwasser mit Geschiebe, viele Muren, 1 Gebäude beschädigt heftige Gewitterregen über dem Mittellauf (14.08.1966)
1985	Hochwasser mit 35 m³/s nach Aufzeichnungen des Hydrographischen Dienstes Tirol intensive Dauerregen (05. bis 06.08.1985)
2005	Hochwasser mit Geschiebe, bis 1 m unter die Ufermaueroberkante intensive Dauerregen (22. bis 23.08.2005)

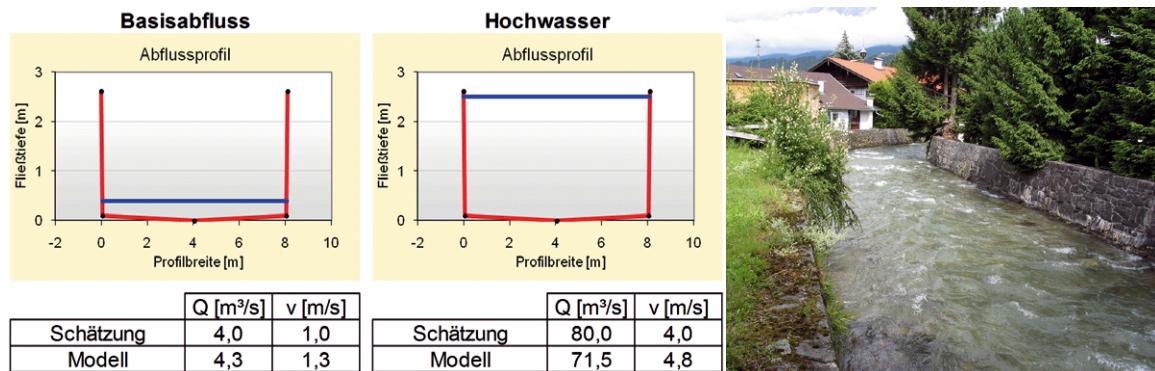


Abb. 8.89 Abschätzung beobachteter aktueller Abflüsse zum Zeitpunkt der Begehung und bordvoller Abflüsse bei Hochwasser im Vergleich zum Modell ZEMOKOST

Vergleich zwischen modelliertem Basisabfluss und beobachteten, geschätzten oder gemessenen Abflüssen zum Zeitpunkt der Geländeaufnahmen: Der am Profil der Unterlaufkünette berechnete Basisabfluss am Tag der Feldbegehung betrug $4 \text{ m}^3/\text{s}$, die modellierte Abflussspitze eines jährlich auftretenden 12-stündigen Bemessungsniederschlags beträgt $4,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Vergleich von Fließgeschwindigkeiten des modellierten Basisabflusses mit beobachteten, geschätzten oder gemessenen Geschwindigkeiten an Abflussprofilen: Die geschätzte Fließgeschwindigkeit des Basisabflusses am beobachteten Querprofil betrug 1 m/s , die mittlere Fließgeschwindigkeit des simulierten jährlich auftretenden 12-stündigen Bemessungsniederschlags beträgt $1,3 \text{ m/s}$.

Gegenüberstellung der modellierten Spitzenabflüsse für die Bemessung mit geschätzten Hochwasserspitzen an Gerinneprofilen: Die am Profil der Unterlaufkünette geschätzte bordvolle Hochwasserspitze beträgt $80 \text{ m}^3/\text{s}$, die Abflussspitze aus ZEMOKOST unter Zugrundelegung von Bemessungsniederschlägen der Jährlichkeit $n = 100$ Jahre beträgt $61 \text{ m}^3/\text{s}$ ($71,5 \text{ m}^3/\text{s}$ bei $n = 150$). Die modellierten und geschätzten Abflussspitzen an den repräsentativen Abflussprofilen (7 Profile) liegen in einer vergleichbaren Größenordnung ($R^2 = 0,82$).

Vergleich der simulierten Fließgeschwindigkeiten des Spitzenabflusses mit anderen Fließformelansätzen an Abflussprofilen: Geschätzte und simulierte Fließgeschwindigkeiten der Spitzenabflüsse entsprechen einander ($R^2 = 0,86$). Am Profil der Unterlaufkünette erreicht die modellierte Abflussspitze eine Geschwindigkeit von $4,8 \text{ m/s}$ gegenüber 4 m/s der Schätzung.

Gegenüberstellung der modellierten Spitzenabflüsse für die Bemessung mit Ergebnissen empirischer Hochwasserformeln: Von 28 Schätzformeln, die unter Vernachlässigung von Einschränkungen angewendet wurden, liegen nur drei unter dem modellierten Hochwassererwartungswert von $72 \text{ m}^3/\text{s}$ für $n = 150$. Der Mittelwert der Schätzformeln ist mehr als doppelt so hoch ($166 \text{ m}^3/\text{s}$), die meisten Schätzformeln überschätzen Spitzenabflüsse von Einzugsgebieten dieser Größenordnung.

Vergleich der modellierten Konzentrationszeit mit empirischen Fließzeitansätzen: Die Konzentrationszeit der modellierten Hochwasserspitze beträgt 203 Minuten, der Mittelwert von 34 Fließformelansätzen 213 Minuten.

5.3.4. HQ_n -spezifische regionale Einordnung der Niederschlag-Abfluss-Modellierung

In Abb. 8.90 werden die Modellergebnisse aus dem HOWATI-Projekt mit den Jahreshochwässern aus der Hochwasserstatistik verglichen. Die durchgezogene schwarze Linie zeigt die statistische Auswertung der Monte-Carlo-Simulation mit KAMPUS; der entsprechende HQ_{100} -Wert liegt bei $54 \text{ m}^3/\text{s}$. Demgegenüber liegt das Ergebnis für ZEMOKOST mit dem 100-jährlichen Bemessungsniederschlag bei $61 \text{ m}^3/\text{s}$. Vergleicht man diese Werte mit der statistischen Schätzung anhand der Hochwasserdaten 1971 bis 2015 ($28,4 \text{ m}^3/\text{s}$, Abb. 8.86) und den HORA-Auswertungen ($34 \text{ m}^3/\text{s}$, Merz et al. 2008a), wird eine markante Abweichung deutlich. Die

Ergebnisse der HQ_{100} -Modellierung liegen damit außerhalb des in Abb. 8.86 dargestellten Konfidenzintervalls. Dies ist nicht überraschend, da das Konfidenzintervall nur die Parameterunsicherheit infolge endlicher Reihenlänge, jedoch nicht die Unsicherheit infolge der Wahl der Verteilungsfunktion (in diesem Fall GEV) beschreibt. Die Abflussmessreihe des Weerbachs weist als höchstes gemessenes Hochwasser (HHQ) 35 m^3/s aus.

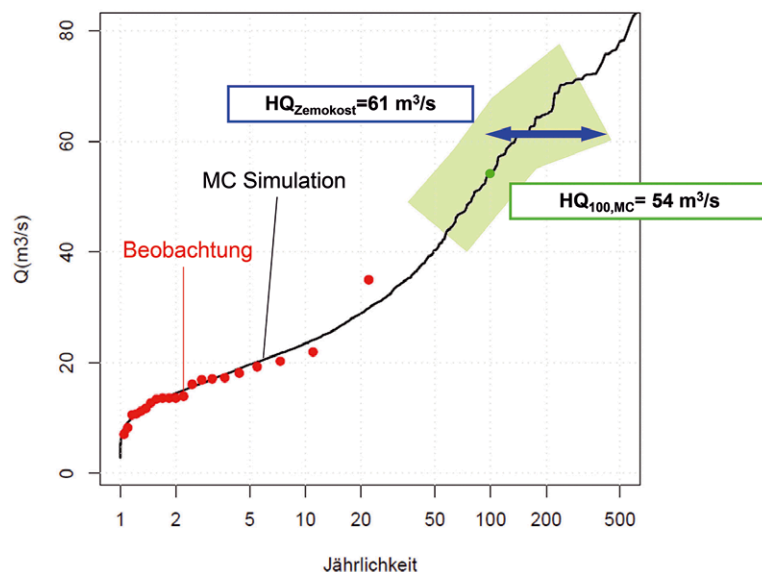


Abb. 8.90 HOWATI: Zusammenstellung der Ergebnisse der HQ_{100} -Simulation mit dem Ereignismodell ZEMOKOST ($HQ_{ZEMOKOST} = 61 m^3/s$), der Monte-Carlo-Simulation mit KAMPUS ($HQ_{100,MC} = 54 m^3/s$) und der Hochwasserstatistik

Tab. 8.44 Pegeldaten für die regionale Einordnung der Ergebnisse (Datenquelle: eHYD)

Pegel-ID	Pegel-Name	Gewässer-name	EZG [km ²]	Datenver-fügbarkeit		HHQ [m ³ /s]	HHQ Datum	MJHQ [m ³ /s]
				von	bis			
201582	Mühlen	Navisbach	61,5	1971	2015	24	28.07.2012	12,4
201657	Wattens	Wattenbach	73,9	1973	2015	33,5	08.08.1991	13,4
230755	Schwendberg-Aue	Sidanbach	16	1996	2015	17,5	12.08.2000	6,5
201665	Weer	Weerbach	72,8	1971	2015	35,2	06.08.1985	14,2
201558	St. Jodok am Brenner	Valserbach	108,8	1951	2015	42	21.08.1956	19,7
201574	Puig	Sill	341,8	1951	2015	127	28.06.1997	60,2
201863	Bruckhäusl	Brixentaler Ache	322,3	1951	2015	240	29.07.1969	100,4
201822	Mariathal	Brandenberger Ache	272,6	1976	2015	317	06.08.1985	160,5
230896	Steinberg am Rofan-Außersteinberg	Grundache	15	1981	2015	24,1	06.08.1985	8,6

Zur Informationserweiterung werden diese Ergebnisse gemäß **Box 5.11** regional eingeordnet. In Tab. 8.44 sind die dafür verwendeten Pegel aus der Region mittleres/unteres Inntal inklusive der Kenndaten HHQ (größtes gemessenes Ereignis) und $MJHQ$ (mittleres jährliches Hochwasser) für die jeweils angegebenen Datenreihen aufgelistet. Die in der Spalte Pegel-ID blau hinterlegten Pegel liegen alle in den Tuxer Alpen zwischen Sill, Inn und Ziller, wo sich das Untersuchungsgebiet Weerbach befindet (vergleiche Abb. 8.71). Während Weerbach und Wattenbach direkt in den Inn münden, sind Navisbach und Valserbach Zubringer zur Sill und der Sidanbach mündet in den Ziller. Der Pegel Puig liegt direkt an der Sill, welche wie die Brixentaler Ache ein südlicher Innzubringer ist. Die Brandenberger Ache (Pegel Mariathal) ist ein nördlicher Innzubringer und der Pegel Steinberg am Rofan misst ein Teileinzugsgebiet im Gebiet der Brandenberger Ache. Die Pegel St. Jodok und Bruckhäusl liegen außerhalb Abb. 8.71.

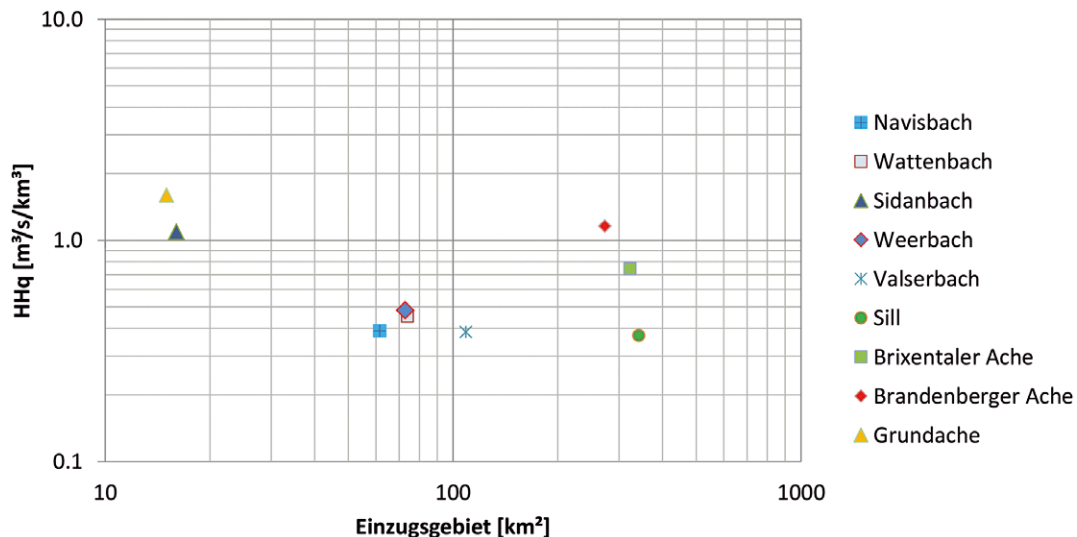


Abb. 8.91 Größte beobachtete Hochwasserspenden (HHQ) im regionalen Vergleich

Das HHQ -Spendendiagramm in Abb. 8.91 zeigt deutlich die regionalen Unterschiede in den Hochwasserspenden an. Beispielsweise hatten die Brandenberger Ache und der Weerbach beim selben Hochwasserereignis am 06.08.1985 ihr größtes beobachtetes Ereignis. Trotzdem unterscheiden sich die Spenden deutlich, denn die Gebiete nördlich des Inn haben eine andere Gebietscharakteristik (Höhenlage, Geologie) und haben aufgrund der Nähe zum Alpennordrand größere Niederschlagsjahressummen. Auch die Hochwasserspenden der beiden größeren südlichen Innzubringer Sill und Brixentaler Ache unterscheiden sich. Die weiter östlich liegende Brixentaler Ache liegt ebenfalls in einem Gebiet mit größeren Jahresniederschlägen, weshalb HHQ und $MJHQ$ recht deutlich über den Werten vom Pegel Puig/Sill liegen. Die Gebietscharakteristiken der Einzugsgebiete in den Tuxer Alpen stimmen relativ gut überein. Allerdings liegen die Werte von Weerbach, Wattenbach, Navisbach und Valserbach vergleichsweise tief und haben ein ähnliches Niveau wie die HHQ -Spende des wesentlich größeren Einzugsgebiets des Pegels Puig an der Sill.

Abb. 8.92 stellt die HQ_{100} -Spenden der Gebiete in den Tuxer Alpen und der Sill dar. Aufgrund der abweichenden Saisonalität und der unterschiedlichen Gebietseigenschaften sind die Hochwasserwerte der Brandenberger Ache und der Brixentaler Ache nicht eingezeichnet. Zusätzlich zu den Ergebnissen der Hochwasserstatistik wurden für den Weerbach, Navisbach und Wattenbach die Modellergebnisse aus dem HOWATI-Projekt dargestellt. Die erhöhten HQ_{100} -Werte des Weerbachs der N-A-Modelle KAMPUS und ZEMOKOST wurden in der Abbildung mittels einer Regression mit den Ergebnissen der Hochwasserstatistik des Sidanbachs und der Sill verglichen. Die resultierende Spendenlinie hat eine plausible Steigung von $\alpha = -0,45$ die im Bereich der Spendelinien nach Wundt ($\alpha = -0,4$) bzw. Hofbauer ($\alpha = -0,5$) liegt. Die N-A-Modelle des Navis- und des Wattenbachs liegen ebenfalls im Bereich dieser Spendenlinie.

Rogger et al. (2011ab) erklären die unterschiedlichen Ergebnisse der verschiedenen Methoden damit, dass die Wahl des Niederschlagsinputs entscheidend ist, um die Hochwasserwerte mit dem N-A-Modell nicht zu überschätzen. Zusätzlich kann die statistische Verteilungsfunktion in Gebieten mit einer großen Speicherkapazität des Untergrunds – wie dem Weerbach – einen Knick haben, welcher zu deutlich höheren Hochwasserwerten führt als die übliche Pegelstatistik. Dieser Schwellenwertprozess wird durch die große Speicherkapazität der Teilgebiete mit tiefgründigen Abflussprozessen (siehe Abb. 8.68) erklärt. Erst bei großen Niederschlagsereignissen kommt es gleichzeitig zu einem Überlaufen der großen Speicherflächen im Gebiet, weshalb plötzlich ein wesentlich größerer Teil des Einzugsgebiets zum Abfluss beiträgt als bei kleinen Niederschlagsereignissen.

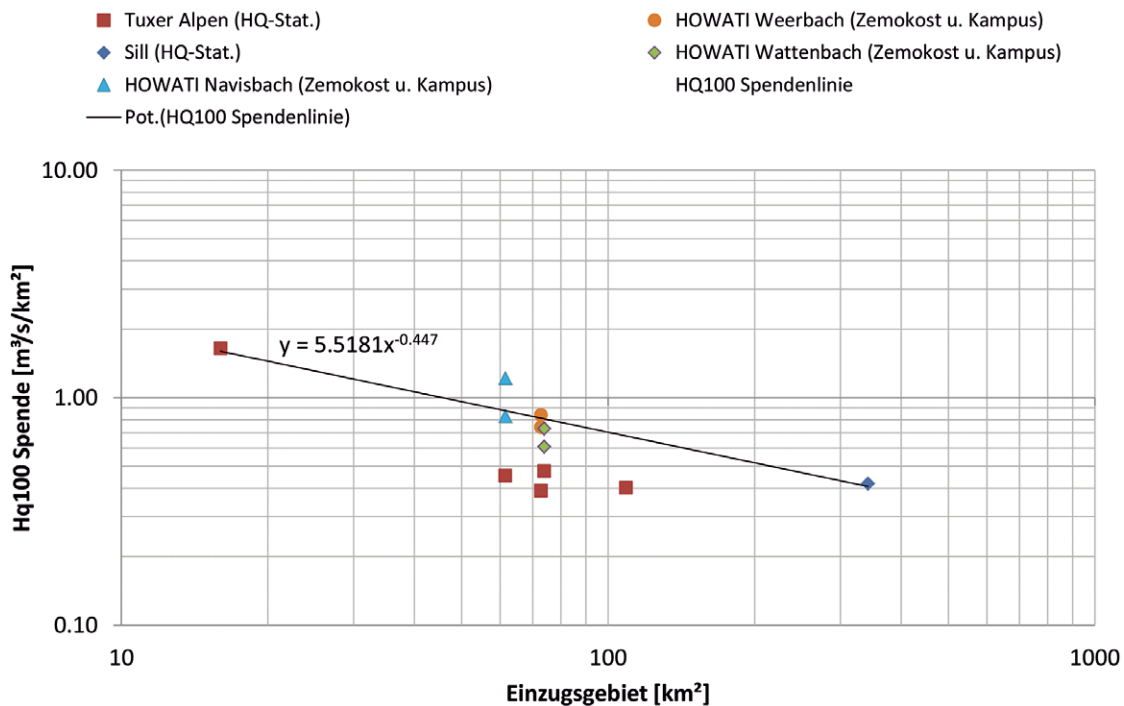


Abb. 8.92 HQ₁₀₀-Spendendiagramm

5.4. Modellanwendung auf Aufgabenstellung

Für KAMPUS und ZEMOKOST ist die Modellanwendung auf das HQ₁₀₀ in Abschnitt 5.3. dieses Synthesebeispiels dargestellt. Für HQsim zeigt Abb. 8.93 die Anwendung im Rahmen des Hochwasserprognosemodells HoPI für den Inn in Tirol. Im obersten Diagramm werden darin die Abflüsse der vorangegangenen vier Tage (Pegelmessung schwarz; Modellierung rot) und die für die kommenden fünf Tage prognostizierten Abflüsse als Ergebnis von zwei verschiedenen Niederschlagsinputs dargestellt (rot und blau). Im zweiten und dritten Diagramm sind die Summenlinien der Inputniederschläge (mittlerer Gebietsniederschlag) und der Inputtemperaturverlauf (bezogen auf die mittlere Gebietshöhe) dargestellt, welche mit den Messwerten der Station Wattener Lizum verglichen werden. Im untersten Diagramm werden die Unsicherheiten der aktuellen Abflussmodellierung und der vergangenen Abflussprognosen anhand der gemessenen und simulierten Abflüsse inklusive des Ensembles vergangener Rechenläufe (graue Kurvenschar) visualisiert.

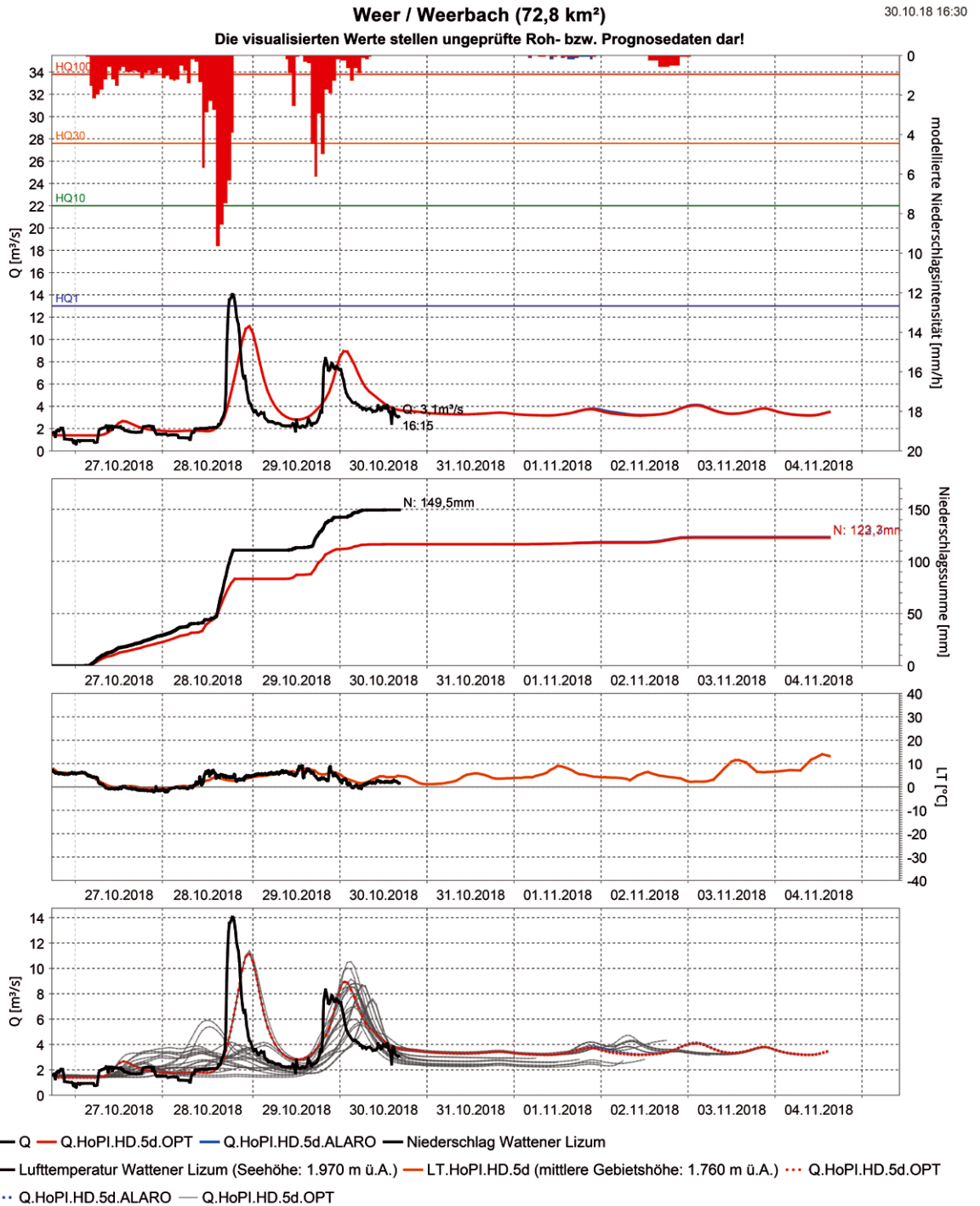


Abb. 8.93 Abflussprognosen für den Weerbach als Teil des Hochwasserprognosesystems Inn (HoPI, Quelle: HD Tirol)

6. Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse

6.1. Beurteilung der Unsicherheiten der Ergebnisse

Die Modellvalidierung anhand von Abflussdaten bzw. die Plausibilisierung anhand zusätzlicher Informationen sind die wichtigsten Instrumente zur Abschätzung der Unsicherheiten (**Box 6.1**). Nachfolgend wird der Umgang mit den verschiedenen Quellen von Unsicherheiten beschrieben.

Datenunsicherheit: Mehrmals wurde im vorliegenden Synthesebeispiel auf unsichere Inputniederschläge – insbesondere bei der Simulation von Hochwasserereignissen – hingewiesen. In Abb. 8.87 zeigt sich, dass das KAMPUS-Modell dafür geeignet ist, die Abflussscheitel der großen Hochwasserereignisse der Pegelreihe gut wiederzugeben. Um das größte beobachtete Ereignis am 06.08.1985 gut nachrechnen zu können, mussten aber die Niederschlagsdaten an der Station Wattener Lizum korrigiert werden (Rogger et al. 2012b). Die Unsicherheiten bei der Simulation des Jahreshochwassers 2012 mit HQsim könnten ebenfalls auf Fehler des Modellinputniederschlags zurückgeführt werden (siehe Abb. 8.83 und Abb. 8.85). Um den systematischen Messfehler des Schneeniederschlags auszugleichen, verfügen HQsim und KAMPUS über einen entsprechenden Korrekturfaktor. Aus der Kalibrierung des Modells anhand von Schneeflächen- und Abflussdaten ergibt sich für HQSim ein Schneekorrekturfaktor von 1,17. Das bedeutet, dass der Schneeniederschlag in den Inputdaten deutlich unterschätzt wird und der zutreffende Wert im Mittel etwa 17 % größer ist. Die Unsicherheiten der für die Abflussvorhersage am Inn (Projekt HoPI) verwendeten Daten wurden von Achleitner et al. (2012) untersucht. Die Niederschlagsprognosen der analysierten 48-Stunden-Prognosen zeigen tendenziell in den ersten Stunden (ca. 10 h) die geringsten Fehler. Wegen der Nichtlinearität der Abflussbildung und wegen der Modell- und Parameterunsicherheit sind die Fehler der Abflussprognose größer. Die Verwendung von Nachführalgorithmen können die Fehler in den ersten Stunden des Prognosehorizonts reduzieren (Blöschl et al. 2008ab).

Modellstruktur: Hydrologische Prozesse, die in der Modellstruktur nicht berücksichtigt werden, aber einen wesentlichen Anteil am Abfluss haben, führen zu Abweichungen bei den Ergebnissen des N-A-Modells. Die Wildbachchronik des Weerbachs (Tab. 8.43) belegt, dass die großen Hochwässer am Weerbach (wie z. B. das Hochwasser im Jahr 2005) zumeist auch einen hohen Geschiebeanteil aufweisen. Deswegen könnten die Unsicherheiten bei der Simulation des Hochwassers 2005 (Abb. 8.81) auch mit dem nicht berücksichtigten Feststofftransport zusammenhängen. Bei Regen-auf-Schnee-Ereignissen kann die sehr hohe Vorbefeuchtung des Bodens zu sehr großen Abflüssen führen, die durch die üblichen Abflussbildungsansätze unterschätzt werden (Blöschl et al. 2008b).

Parameterunsicherheit: Um die Empfindlichkeit der Modellergebnisse auf die Modellparameter zu untersuchen, empfiehlt **Box 6.1** die Durchführung von Sensitivitätsanalysen. Als Grundlage für die automatisierte Kalibrierung des HQsim-Modells am Weerbach wurde das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse (Achleitner et al. 2009) verwendet, das eine Grundlage für die Wahl der Wertebereiche der einzelnen Parameter lieferte. Zudem zeigte es die nicht sensitiven Modellparameter auf, die in Folge nicht variiert werden mussten.

Wie in Kapitel 4.4. dieses Synthesebeispiels beschrieben, wurde für die automatisierte Kalibrierung eine Zielfunktion (Gl. 2) aufgestellt, die mittels Bias und NSE separate Ergebnisse für die saisonalen Abflüsse der einzelnen Jahre und die größten Hochwasserereignisse zusammengefasst bewertet. In Abb. 8.94 sind daraus die Ergebnisse für die einzelnen Hochwassersaisonen der Jahre 2001 bis 2009 in Form des relativen Bias und für die 6 größten Hochwasserereignissimulationen in Form des NSE dargestellt. In den Diagrammen werden jeweils die Verteilungen der besten 10 % der insgesamt 20.000 Simulationsläufe als Boxplots dargestellt. Mit dem Stern wird die Lage der Simulation gekennzeichnet, deren Parametersatz als Endergebnis ausgewählt wurde, der in der Kalibrierung und der Validierung gute Ergebnisse lieferte und hydrologisch plausibel ist. Der Großteil der Simulationen berechnet die Wasserbilanz (bewertet mit dem relativen Bias) auf der saisonalen Skala zufriedenstellend und

die Ergebnisse liegen nahe dem Optimum bei Null (Abb. 8.94, oben). Einzig die Wasserfracht im Sommer 2001 wird deutlich überschätzt und im Sommer 2008 deutlich unterschätzt. Dies deutet auf zufällige Datenfehler hin. Der Bias-Wert der Ergebnissimulation (Stern) liegt aber in allen Jahren im oberen Bereich des Interquartilsabstands. Das kann durch die Hinzunahme der Hochwassersimulationen in die Zielfunktion (Gl. 2) erklärt werden. Für die Jahreshochwässer 2001 und 2002 (Abb. 8.94, unten) liegen die NSE-Werte bei 0 oder darunter, was für stark fehlerhafte Simulationen steht. Für das Hochwasser 2004 erreicht der obere Bereich der Verteilung bereits gute Werte und bei den verbleibenden Ereignissen liegen alle NSE-Werte in einem zufriedenstellenden Bereich. Die Ergebnisverteilung des größten Hochwassers in der Kalibrierperiode (Jahr 2005) schneidet insgesamt am besten ab, was für die Anwendung zur Hochwasserprognose besonders wichtig ist.

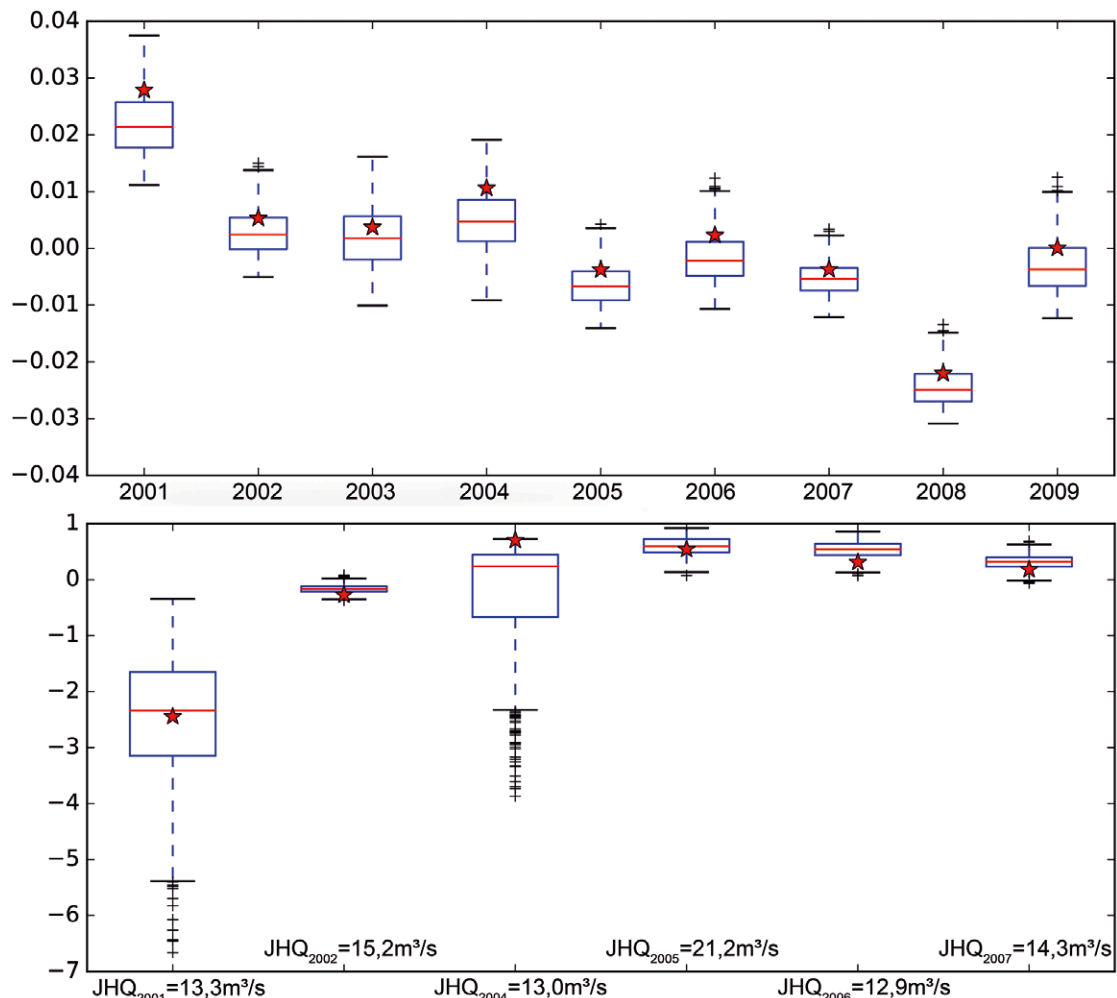


Abb. 8.94 Simulationsgüte (RBIAS) des HQsim-Modells für die Hochwassersaisonen 2001 bis 2009 (oben) und für die größten Jahreshochwässer (NSE) in der Kalibrierperiode (unten). In den Boxplots entspricht die Box dem Bereich, in dem die mittleren 50 % der Daten liegen. Der Median ist als durchgehender Strich in der Box eingezeichnet. Die außerhalb der Box liegenden Werte, die durch die Antennen bzw. den Whisker dargestellt sind, entsprechen maximal dem 1,5-Fachen des Interquartilsabstands, Ausreißer aus diesem Bereich werden als + dargestellt. Der rote Stern stellt die Lage der Simulation dar, die das Ergebnis der Kalibrierung und Validierung darstellt

Die Auswertung der Ergebnisse dieser Monte-Carlo-Simulationen zeigt deutlich, dass es in der Regel nicht einen Parametersatz gibt, der bei allen Ergebnissen gut abschneidet. Lässt man die Jahreshochwässer 2001 und 2002 außer Acht (alle Rechenläufe bringen schlechte Ergebnisse), dann zeigt sich, dass der rote Stern in Abb. 8.94 im Bereich des Optimums für das Jahreshochwasser 2004 liegt, beim Jahreshochwasser 2005 im Bereich des Medians liegt und 2006 und 2007 im unteren Bereich der Verteilung liegt. Obwohl das Ziel dieser Modellanwendung bei den Hochwässern liegt, erwies sich ein zu hohes Gewicht auf die Jah-

reshochwässer während der Kalibrierung als nicht zielführend, da ansonsten die Zeiträume mit Normalabflüssen häufig stark überschätzt wurden. Es müssen also bei der Auswahl eines Ergebnisses aus der Vielzahl von Resultaten Kompromisse eingegangen werden. Aus diesem Grund wird für automatische Kalibrierungen die Berücksichtigung quantitativer Zusatzinformationen empfohlen (**Box 4.10**). Bellinger (2015) konnte an den Beispielen Weerbach und Wattenbach zeigen, dass die Hinzunahme von Schneedaten in die Modellkalibrierung zu einer verbesserten Simulation der Schmelzperiode führt.

6.2. Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

Das HOWATI-Projekt erbrachte für den Weerbach gut übereinstimmende N-A-Modellergebnisse (KAMPUS und ZEMOKOST), die aber deutlich über der Hochwasserstatistik liegen. Diese Ergebnisse werden durch die konsistente Vorgehensweise im Rahmen von Monte-Carlo-Simulationen belegt, bei der lange Zeitreihen des Niederschlags generiert und durch das Abflussmodell in Abflüsse umgelegt werden, anhand derer eine aussagekräftige Hochwasserstatistik erstellt wurde. Mit ZEMOKOST wurde durch eine Kombination ungünstiger – aber dennoch plausibler – Bedingungen hinsichtlich des Niederschlags und der Modellparameter ein oberer Grenzwert des Bemessungshochwassers angeschätzt.

Die Monte-Carlo-Simulationen der automatischen Kalibrierung des HQsim-Modells, das den Weerbach als Zubringer zum Inn im Rahmen des Hochwasserprognosemodells HoPI simuliert, zeigte die Unsicherheiten der Niederschlagsdaten bei der Simulation mancher Hochwässer und eine teilweise große Parameterunsicherheit. Zur Auswahl eines endgültigen Parametersatzes mussten Kompromisse eingegangen werden, denn ein Parametersatz ist in der Regel nicht in der Lage bei allen bewerteten saisonalen Abflüssen und Hochwässern optimal abzuschneiden.

In beiden Projekten zeigten die Ergebnisse, dass eine Hinzunahme zusätzlicher Daten zur Informationserweiterung, wie beispielsweise die Wildbachchronik oder Schneekarten, zu plausibleren N-A-Modellen führt und dadurch die Ergebnisse hinsichtlich ihrer wasserwirtschaftlichen Aussagekraft mehr Gewicht verliehen bekommen.



Checkliste zum ÖWAV Regelblatt 220 - Niederschlag-Abflussmodellierung

Dient zur Darstellung der Projektanforderungen für Auftragsvergaben vor Projektbeginn (vorher) sowie zur Darstellung der Durchführung der Modellierung und der Qualität der Ergebnisse bei Projektende (nachher).

Projekttitle:	Synthesebeispiel Weerbach
Projektziel:	Bemessungsereignis HQ100 und Hochwasserprognose
Vorlage für:	
Projektanforderung / Vergabe (vorher): <input type="checkbox"/>	Institution / BearbeiterIn:
Projektbewertung (nachher): <input checked="" type="checkbox"/>	TIWAG, Johannes Schöber

Mit dieser Entscheidungs- und Bewertungshilfe sollen im Sinne des Regelblattes rasch klare Vorgaben und Anforderungen an die Niederschlag-Abflussmodellierung dargestellt werden, z. B. im Zuge einer Ausschreibung oder Angebotslegung, sowie nach Abschluss der Modellierung eine zusammenfassende Gesamtbewertung erfolgen. Sie soll Transparenz schaffen, welcher Leistungsumfang erforderlich ist, und welche Qualität damit erreicht wird. Der Aufwand, der Kosten-Nutzen Faktor und die Qualität der Berechnungen sollen damit klarer kommuniziert werden.

Beachten Sie die jeweiligen einblendbaren Empfehlungen - Boxeninhalte des Regelblattes. Detailinformationen sind dem Regelblatt selbst zu entnehmen.

1. Aufgabenstellung

Die Gliederung nach Aufgabenstellung und Gebietstyp fokussiert die Ausgangslage, den Modellierungsschwerpunkt, und den Projektumfang. Sind Einzelereignisse von Interesse, der kontinuierliche Verlauf des Abflusses oder statistische Aussagen? Sind spezielle Gegebenheiten, wie z.B. Retention oder Veränderungen zu berücksichtigen? Stehen Extremwerte oder der Wasserhaushalt im Vordergrund der Berechnungen?

1. Generell	Generelle Vorgabe				
	HQ Bemessung	Wasserbewirtschaftung	Prognose	Analysen	
	Generelle Aufgabenstellung:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1. Detailliert	Detaillierte Beschreibung				
		Gebirge (Wildbach)	Ländliches Gebiet	Städtisches Gebiet	<i>Empfehlung</i>
	Hochwasserbemessung – Ereignisse / HQn-Scheitelwerte:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.1
	Hochwasserbemessung – Wellenscharen und -volumen:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Hochwasserbemessung – Retentionsberechnungen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Risikoanalyse – Gefahrenzonenplanung / Restrisiko:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Wasserbewirtschaftung – Berechn. von kont. Abflüssen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Wasserbewirtschaftung – Wasserhaushaltskomponenten:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Wasserbewirtschaftung – Spezielle Niederwasserberechnungen:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Abflussprognosen:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Analyse von Veränderungen – Klima, Landnutzung, ...:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Sonstiges (siehe Anmerkungen):	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Anmerkungen: <input style="width: 100%;" type="text"/>					
	HK1	HK2	HK3		
	Klassifizierung nach Hydrologischen Kategorien:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1.2
Argumentation: <input style="width: 100%;" type="text" value="Geringes bis mittleres Schadenspotential, komplexe hydrologische Verhältnisse"/>					

2. Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen

Die Festlegung des Modells und die erreichbare Qualität hängen wesentlich von den verfügbaren Eingangsdaten ab, daher sollten die Daten bereits im Vorhinein erhoben oder gesichtet werden. Spiegeln sich aufwändige Daten auch in einem genaueren Modellergebnis wieder? Welche Gebietsdaten liegen vor bzw. sind erforderlich? Sind zusätzliche Erhebungen erforderlich? Welche Niederschlags- und Pegelaufzeichnungen etc. liegen im Einzugsgebiet, in der Umgebung und in der Region vor? Welche Qualität weisen die Daten auf? Sind Daten von großen Ereignissen vorhanden? Welche statistischen Hochwasserkenngößen liegen vor bzw. sind im Zuge des Projektes zu ermitteln, und wie kann eine Informationserweiterung die Qualität der Ergebnisse verbessern?

2. Generell	Generelle Vorgabe	
	Gewässer / Stelle(n):	<input style="width: 100%;" type="text" value="Weerbach / Pegel Weer"/>
	Zubringer zu:	<input style="width: 100%;" type="text" value="Inn"/>
	Gebiet:	<input style="width: 100%;" type="text" value="Tuxer Alpen / Tirol"/>

Checkliste zum ÖWAV Regelblatt 220 - Niederschlag-Abflussmodellierung

2. Detailliert	Fläche [km²]: <input style="width: 500px;" type="text" value="72,8 km²"/>																																																																																																								
	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 40%;"></td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Daten lokal erheben</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Daten regional erheben</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Auswahl und Aufbereitung von Eingangsgrößen:</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Daten zur Verfügung stellen/gestellt:</td> <td colspan="2" style="border: 1px solid black; padding: 2px;">HD Tirol, ehyd</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Datenprüfung:</td> <td colspan="2" style="border: 1px solid black; height: 20px;"></td> </tr> </table>		Daten lokal erheben	Daten regional erheben	Auswahl und Aufbereitung von Eingangsgrößen:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Daten zur Verfügung stellen/gestellt:	HD Tirol, ehyd		Datenprüfung:																																																																																														
	Daten lokal erheben	Daten regional erheben																																																																																																							
Auswahl und Aufbereitung von Eingangsgrößen:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																																																							
Daten zur Verfügung stellen/gestellt:	HD Tirol, ehyd																																																																																																								
Datenprüfung:																																																																																																									
<h3>Detaillierte Beschreibung</h3> <h4>2.1 Gebietsüberblick und Gebietseigenschaften</h4> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 35%;"></th> <th style="width: 10%; text-align: center;">Ohne Geschiebe</th> <th style="width: 10%; text-align: center;">Geschiebe</th> <th style="width: 10%; text-align: center;">Murartiger Abfluss</th> <th style="width: 10%; text-align: center;">Murgang</th> <th style="width: 10%; text-align: center;">Empfehlung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;">Ereignisklassifizierung nach ONR24800:</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;">2.1 </td> </tr> </tbody> </table> <p style="margin-top: 10px;"><i>Daten und Erhebungen</i></p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;"></th> <th style="width: 15%; text-align: center;">Laserscan</th> <th style="width: 15%; text-align: center;">Vermessung</th> <th style="width: 15%; text-align: center;">Andere</th> <th style="width: 15%; text-align: center;">Keine Daten (indirekt)</th> <th style="width: 20%;"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;">Topographie EZG:</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td rowspan="4" style="vertical-align: middle; text-align: center;">2.2 </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Gewässernetz:</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Kanalnetz:</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Gerinneprofile:</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Zu- / Ableitungen:</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p style="margin-top: 10px;"><i>Detaillierte vorhandene Karten</i></p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;"></th> <th style="width: 15%; text-align: center;">Detaillierte vorhandene Karten</th> <th style="width: 15%; text-align: center;">Feld- begehung</th> <th style="width: 15%; text-align: center;">Nachbar EZG regional</th> <th style="width: 15%; text-align: center;">Keine Daten (indirekt)</th> <th style="width: 20%;"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;">Geologie:</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Kartierung</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Wattenbach</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td rowspan="3" style="vertical-align: middle; text-align: center;">2.3 </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Boden:</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Hydrologischer Atlas Ö.</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Wattenbach</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Vegetation / Landnutzung:</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Corine und Begehung</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Wattenbach</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table> <p style="margin-top: 10px;"><i>Abflussbeiwerte</i></p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;"></th> <th style="width: 15%; text-align: center;">Geländeanleitung (Geländebegehung)</th> <th style="width: 15%; text-align: center;">Regionalisierung</th> <th style="width: 15%; text-align: center;">Abflussbeiwerte aus der Literatur</th> <th style="width: 15%; text-align: center;">Andere</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;">Abflussbeiwerte:</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px;"></td> </tr> </tbody> </table> <p style="margin-top: 10px;">Anmerkungen: <input style="width: 500px;" type="text"/></p> <h4>2.2 Niederschlag und andere meteorologische Messgrößen</h4> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 35%;"></th> <th style="width: 10%; text-align: center;">Messdaten im EZG</th> <th style="width: 10%; text-align: center;">Abschätzdaten im EZG</th> <th style="width: 10%; text-align: center;">Messdaten Nachbar EZG</th> <th style="width: 10%; text-align: center;">Regional</th> <th style="width: 25%;"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;">Niederschlags (Tagessummen):</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td rowspan="4" style="vertical-align: middle; text-align: center;">2.3 </td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Niederschlag (hochaufgelöst):</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Schnee:</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">Temperatur (Tages/hochaufgelöst):</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input type="checkbox"/></td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;"><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>			Ohne Geschiebe	Geschiebe	Murartiger Abfluss	Murgang	Empfehlung	Ereignisklassifizierung nach ONR24800:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.1		Laserscan	Vermessung	Andere	Keine Daten (indirekt)		Topographie EZG:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.2	Gewässernetz:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Kanalnetz:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Gerinneprofile:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Zu- / Ableitungen:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			Detaillierte vorhandene Karten	Feld- begehung	Nachbar EZG regional	Keine Daten (indirekt)		Geologie:	Kartierung	<input checked="" type="checkbox"/>	Wattenbach	<input type="checkbox"/>	2.3	Boden:	Hydrologischer Atlas Ö.	<input checked="" type="checkbox"/>	Wattenbach	<input type="checkbox"/>	Vegetation / Landnutzung:	Corine und Begehung	<input checked="" type="checkbox"/>	Wattenbach	<input type="checkbox"/>		Geländeanleitung (Geländebegehung)	Regionalisierung	Abflussbeiwerte aus der Literatur	Andere	Abflussbeiwerte:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			Messdaten im EZG	Abschätzdaten im EZG	Messdaten Nachbar EZG	Regional		Niederschlags (Tagessummen):	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.3	Niederschlag (hochaufgelöst):	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Schnee:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatur (Tages/hochaufgelöst):	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Ohne Geschiebe	Geschiebe	Murartiger Abfluss	Murgang	Empfehlung																																																																																																				
Ereignisklassifizierung nach ONR24800:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.1																																																																																																				
	Laserscan	Vermessung	Andere	Keine Daten (indirekt)																																																																																																					
Topographie EZG:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.2																																																																																																				
Gewässernetz:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																																																					
Kanalnetz:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																																																																					
Gerinneprofile:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																																																																					
Zu- / Ableitungen:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																																																					
	Detaillierte vorhandene Karten	Feld- begehung	Nachbar EZG regional	Keine Daten (indirekt)																																																																																																					
Geologie:	Kartierung	<input checked="" type="checkbox"/>	Wattenbach	<input type="checkbox"/>	2.3																																																																																																				
Boden:	Hydrologischer Atlas Ö.	<input checked="" type="checkbox"/>	Wattenbach	<input type="checkbox"/>																																																																																																					
Vegetation / Landnutzung:	Corine und Begehung	<input checked="" type="checkbox"/>	Wattenbach	<input type="checkbox"/>																																																																																																					
	Geländeanleitung (Geländebegehung)	Regionalisierung	Abflussbeiwerte aus der Literatur	Andere																																																																																																					
Abflussbeiwerte:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																																																						
	Messdaten im EZG	Abschätzdaten im EZG	Messdaten Nachbar EZG	Regional																																																																																																					
Niederschlags (Tagessummen):	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.3																																																																																																				
Niederschlag (hochaufgelöst):	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																																																																					
Schnee:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																																																																					
Temperatur (Tages/hochaufgelöst):	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																																																																																																					

Strahlung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Verdunstung:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Maßgebende Messstationen:	Wattener Lizum, Weerberg				
	Detailliert geprüft	Grob geprüft	Plausibilisiert	Keine	Empfehlung
Prüfung Niederschlag:	HD Tirol			<input type="checkbox"/>	2.4
	MaxMod Niederschlag	Gewicht. Bem.-niederschlag	ÖKOSTRA Stationsstatistik		
Niederschlagshöhe: eHyd	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		2.5
	Niederschlag Statistik	Anpassung an HQn	Monte Carlo generierter N.		
Niederschlagshöhe: Andere	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	Aus beob. Ereignissen	End- / Anfangs- / Mittenbetont	Doppelereignis	Block	
Zeitl. Niederschlagsverteilung:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.6
	Sanft	Sanft modifiziert	Stark	Keine	
Flächenabminderung N.:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.7
	Aus beob. Ereignissen	Detailliert verteilt	Einfach verteilt	Keine / räuml. konstant	
Räumliches Muster, Gebietsn.:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.8
	Stationsdaten	Fernerkundung	Höhenabhängigkeit		
Räumliche Interpolation Schnee, Lufttemperatur, Verdunstung:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		2.9
Niederschlagsprognosen, Klimawandel:	INCA Niederschlagsprognosen				2.10
Anmerkungen:					
2.3 Abfluss					
	Messdaten im EZG	Abschätzdaten im EZG	Messdaten Nachbar EZG	Regional	
Abflussscheitel v. Ereign.:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2.11
Abflussgangl. von Ereignissen:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Langzeit Abflussganglinien:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
(nur) Wasserstand:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Historische Ereignisse / Stumme Zeugen:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Maßgebende Messstationen / Ereignisstellen:	Pegel Weer				

Checkliste zum ÖWAV Regelblatt 220 - Niederschlag-Abflussmodellierung

	Detailliert geprüft	Grob geprüft	Korrigiert	Plausibilisiert	Empfehlung
Prüfung und Korrektur Abfluss:	<input type="text" value="HD Tirol"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	2.12
Ereignisdokumentation:	<input type="text"/>				2.13
	Durchführen	Übernehmen von	Infoerweiterung	HORA	
Hochwasserabflussstatistik:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.14
	Konfidenzintervalle		Regionale Schwankungsbereiche		
Statistische Unsicherheiten ermitteln / angeben:	<input type="text" value="ermitteln"/>		<input type="text"/>		
	Über Pegelstatistik absichern	Retentionseffekte berechnen	Über Jährlichkeit der Zubringer plausibilisieren	Einfache Hqn-Interpolation (Spende)	
Hqn-Längenschnitt / Retentionseffekte:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Anmerkungen:	<input type="text"/>				

Bewertung

Argumentation:

Einstufung Qualität Eingangsdaten:

Geschätzter Aufwand:

Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung
Eingangsdaten	sehr gering	Keine hydrometeorologischen Daten verfügbar.
	gering	Hydrometeorologische Daten in Nachbargebieten für die Plausibilisierung verfügbar. Bei kleinen Gebieten werden Gebietskenngrößen ohne Feldbegehungen auf Basis benachbarter Gebiete oder regionaler Karten einfach bestimmt.
	mittel	Hydrometeorologische Daten im Einzugsgebiet verfügbar, deren Qualität geprüft wurde. Für Hochwasserfragen sind lokale Reihen mit mittleren Hochwässern sowie regional übertragbare Informationen verfügbar, zudem Niederschlagshöhen und Hochwassermarken. Gebietskenngrößen aus Bodenkarten etc. mit stichprobenartiger Überprüfung durch Feldbegehungen in kleinen Gebieten.
	hoch	Langjährige hydrometeorologische Daten an repräsentativen Stellen im Einzugsgebiet, mit zeitlicher Auflösung entsprechend der Prozessdynamik verfügbar. Umfangreiche Messdatenprüfung und Pegelschlüsselprüfungen. Für Hochwasserfragen sind lange lokale Reihen mit großen Hochwässern sowie regional übertragbare Informationen verfügbar. Detaillierte Gebietskenngrößen, bei kleinen Gebieten aus Feldbegehungen. In städtischen Gebieten detaillierte befestigte Flächen und Kanalsystem. Topographie und Abflussraum aus Vermessungsdaten oder Laserscan.

3. Modellwahl (Modellkonzepte)

Grundsätzlich sind die Modellwahl und Struktur nach folgenden Kriterien festzulegen: Wird die Aufgabenstellung mit dem Modell erfüllt? Entspricht die Datenlage den Modellanforderungen und werden die relevanten Prozesse mit dem Modell erfasst? Wie gut ist die praktische Erfahrung des Modellierers (Referenzen) und ist der Aufwand aufgrund der Datenlage/Kriterien gerechtfertigt? Erforderlichenfalls sollten auch verschiedene Varianten überlegt und bewertet werden.

3. Generell	Generelle Vorgabe					
	Modellwahl:	Ereignisbasiert <input checked="" type="checkbox"/>		Kontinuierlich <input checked="" type="checkbox"/>		
3. Detailliert	Detaillierte Beschreibung					
	3.1 Kriterien für die Modellwahl					
	Gewähltes NA-Modell:	ZEMOKOST, KAMPUS, HQsim			Empfehlung 3.1	
	Gew. Modell – Kriterien Check:	Aufgabenstellung <input checked="" type="checkbox"/>	Datenerford. und -verfügbarkeit <input checked="" type="checkbox"/>	Relevante hydrol. Prozesse <input checked="" type="checkbox"/>		Praktische Erfahrung m. Modell <input checked="" type="checkbox"/>
	3.2 Modelltypen und Gliederung					
	Kausalität des Modells:	White-Box <input type="checkbox"/>	Grey-Box <input checked="" type="checkbox"/>	Black-Box <input type="checkbox"/>		3.2
	Flächengliederung des EZG:	Raster <input checked="" type="checkbox"/>	Teileinzugsgebiete <input type="checkbox"/>	Halbverteilt (HRUs) <input checked="" type="checkbox"/>	Block <input type="checkbox"/>	3.3
	Anzahl der Teilflächen / Auflösung:	200 x 200 m		40, 50		
	Zeitliche Gliederung:	Kontinuierlich <input checked="" type="checkbox"/>	Ereignis-basiert <input checked="" type="checkbox"/>	Zeitliche Aufl. <input type="checkbox"/> Minuten bis 1 Stunde		3.4
	Nachführungsalgorithmen (Prognosemodelle):	Erforderlich <input type="checkbox"/>		Nicht erforderlich <input checked="" type="checkbox"/>		3.5
	3.3 Berechnungsansätze					
	Ansatz – Interzeption:	linear Speicher bzw. nicht berücksichtigt			3.6	
	Ansatz – Verdunstung:	temperaturabhängige Verfahren				
Ansatz – Schnee:	Gradtagverfahren					
Abflussbeiwerte / Verlustraten:	Physikalisch <input type="checkbox"/>	Konzeptionell <input checked="" type="checkbox"/>	Vereinfacht <input type="checkbox"/>	Indirekt / keine <input type="checkbox"/>	3.7	
Ansatz – Abflussbeiwerte / Verlustraten:	zeitl. Abflussbeiwertentwicklung; Abflussbild. abhängig. von Bodenfeuchte			3.8		
Ansatz – Abflusskonzentration:	Transferfunktionen, Berücksichtigung der Konzentrationszeit			3.9		

Checkliste zum ÖWAV Regelblatt 220 - Niederschlag-Abflussmodellierung

				Empfehlung
	Hydraulisch (1D, 2D)	Hydrol.-detailliert	Hydrol.-einfach / lumped	keine
Fließstrecken zwischen Knoten:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Retentionsbecken:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3.10				
Anmerkungen:	Gliederung und Modellansätze je nach eingesetzten Modell unterschiedlich			
Bewertung				
Argumentation:	wesentliche Prozesse der Abflussbildung in den Modellen abgebildet, tw. Vereinfachung der Modellstruktur			
Einstufung Qualität Modellstruktur:	mittel / hoch			
Geschätzter Aufwand:	hoch			
Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung		
Modellstruktur	sehr gering	Keine NA Modellierung im eigentlichen Sinn, Verwendung von Faustformeln und vereinfachten NA Beziehungen		
	gering	Konzeptionelle Beschreibung der wichtigsten Prozesse stark vereinfacht und räumlich aggregiert		
	mittel	Alle relevanten Prozesse sind im Modell zumindest konzeptionell abgebildet. Die zeitliche und räumliche Auflösung ist zur Beschreibung der Prozesse ausreichend. Gewisse Kompromisse bei Modellstruktur zur Vereinfachung		
	hoch	Modellstruktur für Aufgabenstellung ideal geeignet. Die Berechnungsansätze des Modells entsprechen den maßgebenden NA Prozessen im EG, und dies wird begründet. Alle Prozesse in ausreichender zeitlicher und räumlicher Auflösung abgebildet. Anm: Es ist nicht sinnvoll ein detailliertes NA Modell zu betreiben wenn die Datenlage dies nicht unterstützt!		

4. Wahl der Modellparameterwerte

Mit der Kalibrierung des NA Modells soll gewährleistet werden, dass die hydrologischen Prozesse der Natur (Abflussbildung, Abflusskonzentration, Routing, Retention, ...) im Modell richtig abgebildet werden. Bilden die vorhandenen Daten/Ereignisse eine gute Kalibrierbasis entsprechend der Aufgabenstellung? Sind Übertragungen aus regionalen NA-Analysen/Ereignissen erforderlich? Welche Prozesse/Parameter haben einen maßgebenden Einfluss auf die Ergebnisse und sind daher prioritär zu betrachten? Verbessert eine Feldbegehung die Qualität des Modells und die Ergebnisse? Sind die Parameter für Gebiete ohne Abflussmessungen bzw. geänderte Bedingungen zutreffend?

4. Generell	Generelle Vorgabe			
	A priori	Kalibrierung am Abfluss	Regionale Übertragung	
	Modellparameter: <input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4. Detailliert	Detaillierte Beschreibung			
	4.2 Vorgangsweise bei der Parameterwahl			
	Verwendung Zusatzinformation	Abstimmung auf EZG-Typ	DPC Konzept (Dominante Prozesse)	
	Vorgangsweise: <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.1 4.2 4.3


4.3 A priori Parameter

	Detaillierte Feldbegehung	Teilbegehung	Abflussdaten	Empfehlung
Prozessanalysen:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.4 
	Feldbegehung	Gebietseigenschaften	Regional	4.5 
Apriori Parameter:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.6 

4.4 Parameterkalibrierung am Abfluss


Keine Kalibrierung:	<input type="checkbox"/>	EZG / Pegel	4.7 
Lokal, direkt im EZG:	<input checked="" type="checkbox"/>	Pegel Weer	
Regional, an ähnliche Nachbar EZGe (Anzahl)	<input type="checkbox"/>		
	klein	mittel	groß
HQ-Ereignisgrößen:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Länge kont. Abflusszeitreihen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Erzielte Anpassungsgüte an den Abfluss



	gering	mittel	groß	
Jahresabfluss:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.8 
Abflussscheitel:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Ganglinien:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Kalibrierung:	manuell <input checked="" type="checkbox"/>	automatisch <input checked="" type="checkbox"/>	Reduktion Überparametrisierung <input type="checkbox"/>	4.9 
				4.10 
				4.11 

4.5 Parameter für Gebiete ohne Abflussdaten

	Reg. Kalibrierung	Reg. Parameter aus externen Analysen	Feldanleitung a priori	Karten; Studien; a priori	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.12 
Detaillierte Bewertung der Übertragung:	Darstellen <input type="checkbox"/>		Nicht darstellen <input type="checkbox"/>		

4.6 Parameter für geänderte Bedingungen

	Berücksichtigen	Nicht berücksichtigen	
Landnutzung:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.13 
Klimaänderung:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.14 

Anmerkungen:

Bewertung

Argumentation:

Einstufung Qualität Parameterwahl:









Geschätzter Aufwand:

Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung
Parameterwahl	sehr gering	Keine gemessenen Abflussdaten im Gebiet, keine Feldbegehung, Literaturwerte für Parameter
	gering	Keine gemessenen Abflussdaten im Gebiet. Parameterwahl aufgrund von Feldbegehung und Erfahrungswerten. Oder: regionalisierte Parameter aus Pegeln mit geringer/mittlerer Übertragbarkeit
	mittel	Mehrere gemessene Abflussereignisse mittlerer Größe bzw. mehrere Jahre Abflussdaten bei kontinuierlichen Modellen. Oder: regional ermittelte Parameter von mehreren Pegeln mit sehr guter Übertragbarkeit. Oder bei Kleinstzugsgebieten: detaillierte Feldmessungen (z.B. Beregnung). In allen Fällen Feldbegehungen
	hoch	Kalibrierung an mehreren gemessenen großen Abflussereignissen bzw. bei kontinuierlichen Modellen an langen gemessenen Abflusszeitreihen. Alle für die Aufgabenstellung zu erwartenden Charakteristiken der Ereignisse sind im Modellierungsdatensatz enthalten. Zusätzlich gute Modellanpassung erzielt.

5. Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung

Mit der Validierung wird überprüft, ob dem Modell auch in der Anwendungssituation vertraut werden kann. Wurde eine Validierung mit von der Kalibrierung unabhängige Abflussdaten durchgeführt? Wie ist die Simulationsgüte für den Validierungsdatensatz? Wie sind die Ergebnisse der Modellplausibilisierung für unbeobachtete EGe? Wurden, für den Fall von Hochwassersimulationen, HQn spezifische Modellparameter gewählt? Wurden das NA-Modell und die Hochwasserstatistik in Abhängigkeit der vorhandenen Datenqualität aufeinander abgestimmt? Sind die Ergebnisse der regionalen Einordnung plausibel und interpretierbar?

5. Generell	Generelle Vorgabe				
		Validierung	Plausibilisierung		
	NA-Modell:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
		HQn-Kalibrierung	HQn Informationserweiterung		
	HQn-spezifische Aspekte:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
5. Detailliert	Detaillierte Beschreibung				
	5.1 Modellvalidierung an Abflussdaten (Zeitraum der nicht Teil der Kalibrierung ist)				
		Durchführen	Nicht durchführen	<i>Empfehlung</i>	
	Validierung:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5.1	
		Zeitabschnitt	Anzahl der Ereignisse	Ereignisse unterschiedlicher Größe	
	Validierungszeitraum:	<input type="text" value="je nach Modell"/>	<input type="text"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	5.2

	Gütemaße Bias	Einfache, optische Bewertung	Bewertung Qs, V Einzelereignisse	
Güteprüfung der Validierung:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<i>Erzielte Validierungsgüte des Abflusses</i>				
	gering	mittel	Groß	
Jahresabfluss:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Abflussscheitel:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Ganglinien:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Umgang mit schlechten Validierungsergebnissen:	Plausibilisierung anhand zusätzlicher Daten			Empfehlung 5.3 
Anmerkungen:	<input type="text"/>			
5.2 Plausibilisierung von Modellen in unbeobachteten Einzugsgebieten				
	Sättigungsfl.	Erosionsspuren	Schnee	HW-Marken
Ländliche Gebiete:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Ereignis-Chronik	Stumme Zeugen	Dendromorphol. Hinweise	
Wildbach-Gebiete:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5.4 
	ÖWAV-Regelblatt 11,19	Beobachtungen / Überläufe	Vergleich mit anderen Netzen	
Städtische Einzugsgebiete:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Anmerkungen:	Abflussdaten wurden für ZEMOKOST nicht verwendet			
5.3 Spezielle Aspekte bei Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeiten (HQn)				
Relevante Niederschlagsdauerstufen [h]:	74 Minuten, Monte Carlo Simulation			5.5 
	Gleich der Abflussjährlichkeit	Anpassung an HQ-Statistik	Andere	
Jährlichkeit des Bemessungsniederschlags:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5.6 
Vorgangsweise bei HQn-spez. Modellparametern:	<input type="text"/>			5.7 
	gut	mittel	schlecht, keine	Regionale Informationserweiterung
Qualität / Datenlage HQ-Statistik:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Qualität / Datenlage NA-Ereignisse:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gewählte Methodik:	HQn-Kalibrierung	Ereignis Kalibrierung	A priori Parameter	5.8  5.9  5.10 
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Checkliste zum ÖWAV Regelblatt 220 - Niederschlag-Abflussmodellierung

	Spenden Hq	Hq / VD-Direktabfluss-volumen / EZG-Darstellung	<i>Empfehlung</i>
HQn spezifische regionale Einordnung:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5.11
Anmerkungen: <input style="width: 100%;" type="text" value="Unterschiede zw. HQ Statistik und NA Modell werden argumentiert"/>			
5.4 Modellanwendung			
	Durchführen	Nicht durchführen	
Begründung der Lastfälle / Szenarien:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5.12
Anmerkungen: <input style="width: 100%;" type="text" value="HQsim wird als Teil eines Hochwasserprognosesystems angewandt"/>			
Bewertung			
Argumentation: <input style="width: 100%; height: 30px;" type="text"/>			
Einstufung Qualität Validierung / Modell-Plausibilisierung: <input style="width: 100%;" type="text" value="mittel / hoch"/>			
Geschätzter Aufwand: <input style="width: 100%;" type="text" value="hoch"/>			
Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung	
Validierung und Modell-Plausibilisierung	sehr gering	Keine Validierung, vage Plausibilitätsindikatoren. HQn spezifisch: a priori Kalibrierung ohne regionale Informationserweiterung	
	gering	Keine Validierung, nur Plausibilisierung, gute Plausibilitätsindikatoren (z.B. stumme Zeugen; unabhängige regionale Vergleiche) HQn spezifisch: a priori Kalibrierung mit regionaler Informationserweiterung (HQ Statistik oder HQn spez. Parameter)	
	mittel	Validierung an beobachteten Abflussganglinien für unabhängigen Zeitraum oder Einzelereignisse im Gebiet und angemessene Modellgüte bei der Validierung. Oder: Hohe Validierungsqualität an einem nahen Unterlieger- oder Oberliegerpegel. HQn spezifisch: Ereignis Kalibrierung mit regionaler Informationserweiterung (HQ Statistik oder HQn spez. Parameter)	
	hoch	Validierung an beobachteten Abflussganglinien für langen, unabhängigen Zeitraum (von NQ bis HQ) oder mehrere Einzelereignisse unterschiedlicher Größe im Gebiet und hohe Modellgüte bei der Validierung. Qn spezifisch: HQn Validierung oder Ereignis-Validierung im Gebiet mit guter Datenbasis und hoher Modellgüte, mit regionaler Informationserweiterung (HQ Statistik oder HQn spez. Parameter)	


6. Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse

Für die Interpretation der Modellergebnisse ist vor allem bei geringer Datenlage eine Unsicherheits- bzw. Sensitivitätsanalyse bzw. Plausibilisierung der Ergebnisse sehr vorteilhaft. Was ändert sich an den Ergebnissen bei unterschiedlichen Parameterannahmen oder durch Einbeziehung von Ergebnissen anderer Verfahren?


6. Generell	Generelle Vorgabe			
		Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen	Zusammenfass. Bewertung	Berichtslegung
Interpretation und Berichte:		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Detaillierte Beschreibung


6.1 Unsicherheits- / Sensitivitätsanalysen

	Eingangsdaten	Parameter	Modellstruktur	Interpretation	Empfehlung
Sensitivitätsanalyse:	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6.1 

6.2 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse und Checkliste

	Checkliste vorher	Checkliste nachher	Detaillierte hydrol. Interpretation	Detaillierte hydrol. Bewertung	
	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6.2 

6.3 Berichtslegung an Auftraggeber

	Im Detail nachvollziehbar	Überblicksweise nachvollziehbar	Gliederung gemäß Regelblatt	6.3 
Bericht:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Präsentation(en)	Digitale Archivierung aller Informationen	Source Daten freigeben	
Informationsmanagement:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Anmerkungen:

Bewertung

Argumentation:

Einstufung der Qualität:

Geschätzter Aufwand:

Kriterien	Qualitätsstufen	Beschreibung
Unsicherheiten	sehr gering	Keine Unsicherheits- bzw. Sensitivitätsanalyse und keine Interpretation
	gering	Einfache Sensitivitätsanalyse, mögliche gegenseitige Beeinflussung von Parametern wird nicht untersucht. Einfache Interpretation der Ergebnisse
	mittel	Sensitivitätsanalyse einschließlich Beurteilung der Abhängigkeit von Parametern, und Untersuchung verschiedener Szenarien. Weitergehende Interpretation der Ergebnisse und ihrer Unsicherheiten. Checkliste vorher und nachher ausgefüllt. Bericht im Detail nachvollziehbar
	hoch	Detaillierte Unsicherheitsanalyse z.B. basierend auf Monte Carlo Simulationen mit Festlegung von Unsicherheitsbandbreiten. Umfassende Interpretation und Bewertung der Ergebnisse und ihrer Unsicherheiten in Hinblick auf Prozesse und Datensituation. Checkliste vorher und nachher ausgefüllt. Bericht im Detail nachvollziehbar. Vollständiges Informationsmanagement (Präsentationen, Digitale Archivierung aller Informationen, Source Daten freigeben).

6. Detailliert

Zusammenstellung der Bewertung

Projekttitle:

Synthesebeispiel Weerbach

	Einstufung / Bewertung	
	Qualität	Aufwand
Auswahl und Aufbereitung der Eingangsgrößen (Kapitel 2):	hoch	hoch
Modellwahl (Modellkonzepte) (Kapitel 3):	mittel / hoch	hoch
Wahl der Modellparameterwerte (Kapitel 4):	mittel / hoch	hoch
Modellvalidierung, Plausibilisierung und Anwendung (Kapitel 5):	mittel / hoch	hoch
Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse (Kapitel 6):	mittel / hoch	mittel / hoch

Anmerkungen:

Ergebnisse aus zwei umfangreichen Forschungsprojekten, die als praktisches Synthesebeispiel des Regelwerks zusammengefasst werden. Daher hoher Aufwand!

9. Literatur

- Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell and J. Rasmussen (1986): An introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen, „SHE“, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87, 61–77
- Achleitner, S. und J. Schöber (2017): Weiße Wasserspeicher – Analyse und Modellierung der Schneedichte in den österreichischen Alpen und Alpenvorländern. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 69 (3–4), 171–179
- Achleitner, S., M. Rinderer and R. Kirnbauer (2009): Hydrological modeling in alpine catchments: sensing the critical parameters towards an efficient model calibration. *Water Science & Technology-WST*, 60(6): 8.
- Achleitner, S., J. Schöber, M. Rinderer, G. Leonhardt, F. Schöberl, R. Kirnbauer and H. Schönlaub (2012): Analyzing the operational performance of the hydrological models in an alpine flood forecasting system. *Journal of Hydrology*, 412–413, 90–100
- AD-HOC-Arbeitsgruppe Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 392 S., Schweizerbart, Stuttgart.
- Allen, R. G. (1986): A Penman for all Seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112, 348–369
- Allen, R. G., W. O. Pruitt, J. L. Wright, T. A. Howell, F. Ventura, R. Snyder, ... and M. Smith (2006): A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET₀ by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, 81, 1–22
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith (1998): Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300 (9), D05109
- Anderl, B. (1975): Vorhersage von Hochwasserganglinien aus radargemessenem Regen. Dissertation, Universität Karlsruhe 1975, zugl. Univ. Karlsruhe, Institut Wasserbau III, Mitteilungen H. 7
- Andrieu, C., N. De Freitas, A. Doucet, and M. Jordan (2003): An introduction to MCMC for machine learning. *Machine learning*, 50(1-2):5–43.
- Aron, G. and E. White (1982): Fitting a Gamma Distribution over a Synthetic Unit Hydrograph, *Water Resources Bulletin*, 18(1), 95-98
- Asztalos, J., R. Kirnbauer, H. Escher-Vetter and B. Ludwig (2007): A distributed energy balance snow and glacier melt model as a component of a flood forecasting system for the Inn river. Alpine Snow Workshop. Berchtesgaden National Park Research Report, No. 53, 9–17, Munich
- ATV (1986): Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 1.2.6. Die Berechnung des Oberflächenabflusses in Kanalnetzmodellen, Teil 1: Abflussbildung. *Korrespondenz Abwasser* 33 (2), 157–162
- ATV (1987): Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 1.2.6. Die Berechnung des Oberflächenabflusses in Kanalnetzen, Teil 2: Abflusskonzentration. *Korrespondenz Abwasser* 34 (3), 263–269
- ATV-DVWK (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. Merkblatt ATV-DVWK-M 504, DWA, Hennef, 144 S.
- Auer, I., R. Böhm et al. (1998): Klimatographie und Klimaatlas von Oberösterreich - Band 2 Klimatographie, Band 3 Klimaatlas. OÖ Musealverein - Gesellschaft für Landeskunde Linz/Wien und Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.
- Aulitzky, H. (1992): Die Sprache der „Stummen Zeugen“, Tagungspublikation Interpraevent, Band 6, 139–174
- Austrian Standards Institute (2014): Normensammlung Schutz vor Naturgefahren – Die Normenreihe ONR 24800 über Wildbach-, Lawinen- und Steinschlagschutzbauwerke. Wien. ISBN 978-3-85402-290-9
- Beckers, J., B. Smerdon and M. Wilson (2009): Review of hydrologic models for forest management and climate change applications in British Columbia and Alberta. *forrex Forum for Research and Extension in Natural Resources*, Kamloops, BC forrex Series 25. www.forrex.org/publications/forrexseries/fs25.pdf

- Bellinger, J. (2015): Uncertainty Analysis of a hydrological model within the Flood Forecasting of the Tyrolean River Inn. Dissertation, Universität Innsbruck, 193 S.
- Bellinger, J., S. Achleitner, J. Schöber, F. Schöberl, R. Kirnbauer, K. Schneider (2012): The impact of different elevation steps on simulation of snow covered area and the resulting runoff variance. *Advances in Geosciences*, 32: 69-76.
- Bergström, S. (1976): Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI Rapport, RHO 7, Norrköping
- Bergström, S. (1992): The HBV model – its structure and applications. SMHI Reports RH, No. 4, Norrköping
- Bergthaler, J. (1986): Anwendungsbereiche von Hochwasserformeln, *Wildbach- und Lawinenverbau*, 50. Jg. H. 103, S. 50-69
- Beven, K. (1989): Changing ideas in hydrology – the case of physically based models, *Journal of Hydrology*, 105, 157–172
- Beven, K. J. (1995): Topmodel. Chapter 18 in: V. P. Singh (Ed.) Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, pp. 627-668
- Beven, K. J. (2001): Rainfall-runoff Modelling: The Primer. Wiley, Chichester, 360 pp.
- Beven, K. J. and M. J. Kirkby (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43-69
- Bica, B. R. Steinacker, C. Lotteraner and M. Suklitsch (2007): A new concept for high resolution temperature analysis over complex terrain. *Theoretical and Applied Climatology*, 90, 173–183
- Bichler, M. (2015): Unterlagen zur quartärgeologische Kartierung Angertal (vorläufiger Erhebungsstand, GBA)
- Blaney, H. F. and W. D. Criddle (1950): Determining Water Requirements in Irrigated Area from Climatological Irrigation Data, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Tech. Pap. No. 96, 48 pp.
- Blöschl, G. (1996a): Scale and Scaling in Hydrology (Habilitationsschrift). Wiener Mitteilungen, Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 132, Wien, 346 S.
- Blöschl, G. (1996b): Prozeßnahe Niederschlag-Abflußmodellierung, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 48 (5–6), 156–165
- Blöschl, G. (2005): Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments. Article 133 in: Encyclopedia of Hydrological Sciences, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley & Sons, Chichester, 2061–2080
- Blöschl, G. (2007): Einsatz von Simulationsmethoden bei der Bestimmung extremer Abflüsse. In: Gutknecht, D. (Hrsg.): Extreme Abflussereignisse. Wiener Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der TU Wien, Nr. 206, 227–246
- Blöschl, G. (2008): Flood warning – on the value of local information. *International Journal of River Basin Management*, 6 (1), 41–50
- Blöschl, G. (2009): Ingenieurhydrologie. Vorlesungsskriptum. TU Wien
- Blöschl, G. (2016): Prediction in Ungaged Basins, Chapter 127 in: Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill
- Blöschl, G. und R. Grayson (2000): Flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung. In: Niederschlag-Abfluss Modellierung – Simulation und Prognose, Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 164, 33–55
- Blöschl, G. und R. Merz (2002): Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflussmodellierung. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 164, Wien, 149–178
- Blöschl, G. und R. Merz (2008): Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit – Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. *Wasserwirtschaft*, 98 (11), 12–18
- Blöschl, G., R. Kirnbauer and D. Gutknecht, D. (1991): Distributed snowmelt simulations in an Alpine catchment. 1. Model evaluation on the basis of snow cover patterns. *Water Resources Research*, 27 (12), 3171–3179
- Blöschl, G., R. Kirnbauer, J. Jansa, K. Kraus, G. Kuschnig, D. Gutknecht und Ch. Reszler (2002): Einsatz von Fernerkundungsmethoden zur Eichung und Verifikation eines flächendetaillierten Schneemodells. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 54 (1–2), 1–16
- Blöschl, G., C. Reszler and J. Komma (2008a): A spatially distributed flash flood forecasting model. *Environmental Modelling & Software*, 23 (4), 464–478

- Blöschl, G., Ch. Reszler und J. Komma (2008b) Hydrologische Hochwasservorhersage für den Kamp - Erfahrungen mit den Ereignissen 2006 und 2007. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 60 (3-4), pp. a13-a18.
- Blöschl, G., W. Schöner, H. Kroiß, A. P. Blaschke, R. Böhm, K. Haslinger, N. Kreuzinger, R. Merz, J. Parajka, J. L. Salinas und A. Viglione (2011): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – Ziele und Schlussfolgerungen der Studie für Bund und Länder. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63 (1–2), 1–10
- Blöschl, G., M. Sivapalan, T. Wagener, A. Viglione and H. H. G. Savenije (eds.) (2013b): Runoff Prediction in Ungauged Basins – Synthesis across Processes, Places and Scales. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 465 pp.
- Blöschl, G., Th. Nester, J. Komma, J. Parajka und R. A. P. Perdigão (2013a): Das Juni-Hochwasser 2013 – Analyse und Konsequenzen für das Hochwasserrisikomanagement. *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, 158, 141–152
- Blöschl, G., J. Parajka, A. P. Blaschke, M. Hofstätter, K. Haslinger und W. Schöner (2017): Klimawandel in der Wasserwirtschaft – Schwerpunkt Hochwasser, Dürre und Trockenheit. Follow up zur ZAMG/TU Wien Studie (2011): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft im Auftrag von Bund und Ländern. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- Blöschl, G., A. P. Blaschke, K. Haslinger, M. Hofstätter, J. Parajka, J. Salinas und W. Schöner (2018) Auswirkungen der Klimaänderung auf Österreichs Wasserwirtschaft - ein aktualisierter Statusbericht. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 70, in Druck <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0498-0>.
- BMLFUW (2003, 2005, 2007): Hydrologischer Atlas Österreichs. 1. Lieferung 2003. 2. Lieferung 2005. 3. Lieferung 2007. Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- BMLFUW (2007a): Pegelordnung – Richtlinien für Messungen an Pegeln oberirdischer Gewässer. Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- BMLFUW (2007b): Anleitung zur Beobachtung und Messung von meteorologischen Parametern. Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- BMLFUW (2011): Leitfaden „Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten“. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- BMLFUW (2014): Leitfaden Hochwasser-Rückhaltebecken: Grundsätze für Planung, Bau und Betrieb bei der Wildbach- und Lawinerverbauung Österreichs. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- Borga, M., E. N. Anagnostou, G. Blöschl and J.-D. Creutin (2011): Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project. *Environmental Science & Policy*, 14, 834–844
- Bormann, H., H. M. Holländer, T. Blume, W. Buytaert, G. Chirico, J.-F. Exbrayat, D. Gustafsson, H. Hölzel, P. Kraft, T. Krauß, A. Nazemi, C. Stamm, S. Stoll, G. Blöschl und H. Flüher (2011): Modellkonzept vs. Modellierer – wer oder was ist wichtiger, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 4, 487–491
- Braun, L. N. (1984): Simulation of snowmelt-runoff in lowland and lower alpine regions of Switzerland. Doctoral dissertation, Diss. Naturwiss. ETH Zürich, Nr. 7684, 0000
- Bunza, G., J. Karl und J. Mangelsdorf (1982): Geologisch-morphologische Grundlagen der Wildbachkunde, Schriftenreihe des Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft, Heft 17
- Chahinian, N., R. Moussa, P. Andrieux and M. Voltz (2005): Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale, *Journal of Hydrology*, 306, 191–214
- Charbonneau, R., J. P. Lardeau and C. Obled (1981): Problems of modelling a high mountainous drainage basin with predominant snow yields. *Hydrological Sciences Journal*, 26 (4), 345–361
- Chmielewski, F.-M. (2007): Phänologie – ein Indikator zur Beurteilung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biosphäre, *promet* (33), Heft 1/2: Phänologie
- Clausnitzer V., J. W. Hopmans and J. L. Starr (1998): Parameter Uncertainty Analysis of Common Infiltration Models. *Soil Science Society of America Journal*, 62 (6), 1477–1487
- CryoLand (2018): <http://neso1.cryoland.enveo.at/cryoclient/>. Letzter Zugriff am 18.09.2018.

- Dobesch, H. (2003): Mittlere potentielle Jahresverdunstung. Karte 3.2, Hydrologischer Atlas Österreichs, Erläuterungstext zur Karte. In: BMLFUW (2003): Hydrologischer Atlas Österreichs, 1. Lieferung, Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- Doorenbos, J. and W. O. Pruitt (1992): Crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24, FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 145 p. ISSN 0254-5284
- Dorning, M., S. Schneider and R. Steinacker (2008): On the interpolation of precipitation data over complex terrain. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 101, 175–189
- Duethmann, D. and G. Blöschl (2018): Why has catchment evaporation increased in the past 40 years? A data-based study in Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, In press
- DVWK (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil 2: Synthese. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft 113. Parey, Hamburg
- DVWK (1991): Beitrag zur Bestimmung des effektiven Niederschlags für Bemessungshochwasser aus Gebietskenngrößen, Ergebnis einer vergleichenden Untersuchung durch den DVWK-Fachausschuss „Niederschlag-Abfluss-Modelle“, DVWK Materialien 2/1991
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblatt 238/1996, Hennef
- DWA (2007): Verdunstung – Beiträge zum Seminar Verdunstung am 10./11. Oktober 2007 in Potsdam. Hrsg: K. Miegel, H.-B. Kleeberg, Forum für Hydrologie – Heft 21, DWA, Hennef, 248 S.
- DWA (2012): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Merkblatt DWA-M 552, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef
- DWA (2016 – in Bearbeitung): Ermittlung der Verdunstung von Gewässern und von Landflächen unter Berücksichtigung maßgeblicher Standortfaktoren. Neufassung der Merkblätter DVWK 238/1996 und Merkblatt ATV-DVWK-M 504/2002 (in Vorbereitung)
- DWA (2019): Merkblatt DWA-M 922 Bodenhydrologische Kartierung und Modellierung (Gelbdruck 2018, derzeit in Überarbeitung für Druck)
- Dyck, S. und G. Peschke (1995): Grundlagen der Hydrologie. 3. Aufl. Verlag für Bauwesen, Berlin
- eBOD (2016): <https://bfw.ac.at/rz/bfwcms2.web?dok=7066> (Stand Juni 2019)
- Eder, A., R. Sturmlechner, J. Dorner, G. Schmid, P. Strauss, B. Sotier, K. Klebinder und G. Markart (2011): HydroBod NÖ – Hydrologische Bodenkenndaten Niederösterreichs. Unveröffentlichter Projektbericht von BAW und BFW im Auftrag des Landes Niederösterreich und des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach und Lawinenverbauung Wien, Niederösterreich und Burgenland
- Eder, A., G. Blöschl, F. Feichtinger, M. Herndl, G. Klammler, J. Hösch, E. Erhart and P. Strauss (2015): Indirect nitrogen losses of managed soils contributing to greenhouse emissions of agricultural areas in Austria: results from lysimeter studies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 101 (3), 351–364
- Egger, H. und H. Steinwender (2005): Extrapolation von Schlüsselkurven – ein hydraulisch begründeter Ansatz. Diplomarbeit, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fakultät für Bauingenieurwesen
- EN (2004): Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik (EN 1997, bestehend aus 2 Teilnormen)
- Engman, E. T. (1986): Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112, 39–53
- ETALP (2003): Agerer H., H. Aigner, H. Angerer, F. Anker, G. Bunza, E. Ferlan, W. Gattermayr, K. Hafner, F. Hehn, H. Honsowitz, J. Hübl, R. Kirnbauer, W. Klaus, B. Kohl, G. Markart, R. Marschallinger, R. Mayer, M. Mayerl, M. Molk, G. Ofner, H. Pirkl, M. Pittracher, D. Rickenmann, H. Schiegg, M. Schiffer, F. Schmid, R. Schmidt, I. Schnetzer und L. Stepanek (2004): ETALP - Erosion, Transport in Alpinen Systemen - Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten, Projektbericht bestehend aus den Teilen: ETALP Leitfaden; ETALP Handbuch Grundlagen; ETALP Handbuch Regionale Ebene; ETALP Handbuch Mittlere Ebene; ETALP Handbuch Detailebene; ETALP Kompendien; BMLFUW, Wien, 716 pp.

- Exner, C. (1957): Erläuterungen zur geologischen Karte der Umgebung von Gastein; Geologische Bundesanstalt Wien
- FAA (1970): U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration. „Airport Drainage“, Report 150/5320-5B, U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Fang, X., P. Khanal, C. Theodore, T. David and P. Pratistha (2005): Revisit of NRCS unit hydrograph procedures, Proceedings of the ASCE Texas Section Spring Meeting, Austin, Texas
- Federer, C. A. and D. Lash (1978): BROOK: A Hydrologic Simulation Model for Eastern Forests. Water Resource Research Centre, University of New Hampshire, Research Report No. 19
- Flügel, W. A. (1995): Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes*, 9 (3–4), 423–436
- Forster, F. (1992): Anwendungen und Erfahrungen mit dem Simulationsmodell BROOK. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, Interner Hydrologie-Bericht B 349.1
- Gamerith, V. (2011): High resolution online data in sewer water quality modelling Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft der Technischen Universität Graz, Band 64, ISBN 978-3-85125-160-9
- Garcia, R. (2016): Hydraulic design manual http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hyd/manual_notice.htm
(http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hyd/rational_method.htm#i1108889)
- Godina, R., M. Heilig, P. Lalk, G. Müller und V. Weilguni (2007): Das Hochwasser an der Thaya am 29./30. Juni 2006. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 84, 58–70
- Gorte, B. G. H (2000): Land-use and catchment characteristics. In Schultz, G. A., Engman, E. T. (eds.): Remote sensing in hydrology and water management. Berlin, Germany, Springer, 133–156
- Grayson, R. B. and G. Blöschl (Eds) (2000a): Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 404 pp.
- Grayson, R. and G. Blöschl (2000b): Spatial modelling of catchment dynamics. Chapter 3 in R. Grayson and G. Blöschl (eds.): Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 51–81. <http://www.hydro.tuwien.ac.at/forschung/publikationen/engl-publikationen/spatial-patterns-in-catchment-hydrology/>
- Grayson, R. B., G. Blöschl and I. D. Moore (1995) Distributed parameter hydrologic modelling using vector elevation data: THALES and TAPES-C. Chapter 19 in: V. P. Singh (Ed.) Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, pp. 669-696.
- Grebner, D. (1995): Klimatologie und Regionalisierung starker Gebietsniederschläge in der nordalpinen Schweiz. Zürcher Geographische Schriften 59, ETH Zürich
- Green, W. H. and G. Ampt (1911): Studies of soil physics, part I – the flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4, 1–24
- Gutknecht, D. (1972): Vergleichende Untersuchungen zur Berechnung von Hochwasserabflüssen aus kleinen Einzugsgebieten. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 11, 131 S., 35 Anlagen
- Gutknecht, D. (Hrsg.) (2000): Niederschlag-Abfluss-Modellierung – Simulation und Prognose. ÖWAV-Seminar 12.-13. September 2000, Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 164
- Gutknecht, D. (Hrsg.) (2006): Methoden der hydrologischen Regionalisierung. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Heft 197, Wien
- Gutknecht, D. et al. (2009): Leitfaden zum Nachweis der Hochwassersicherheit von Talsperren. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien
- Gutknecht, D., J. Moser und C. Kopeinig (2011): Hochwasserszenarien-katalog Kärnten – Offline Hochwasserprognose Handbuch. TU Wien
- Hagen, K., E. Ganahl und J. Hübl (2007): Analyse und Evaluierung von gebräuchlichen empirischen Ansätzen zur Hochwasserabschätzung in Wildbächen, In: BFW-Berichte – Schriftenreihe des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft, 112 S.

- Haiden, T., A. Kann, C. Wittmann, G. Pistotnik, B. Bica and C. Gruber (2011): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System Its Validation over the Eastern Alpine Region. *Weather and Forecasting*, 26/2, 166–183. doi: 10.1175/2010WAF2222451.1
- Hall, J., B. Arheimer, M. Borga, R. Brázdil, P. Claps, A. Kiss, T. R. Kjeldsen, J. Kriaučiūnienė, Z. W. Kundzewicz, M. Lang, M. C. Llasat, N. Macdonald, N. McIntyre, L. Mediero, B. Merz, R. Merz, P. Molnar, A. Montanari, C. Neuhold, J. Parajka, R. A. P. Perdigão, L. Plavcová, M. Rogger, J. L. Salinas, E. Sauquet, C. Schär, J. Szolgay, A. Viglione and G. Blöschl (2014): Understanding Flood Regime Changes in Europe: A state of the art assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 2735–2772, doi:10.5194/hess-18-2735-2014
- Hamon, W. R. (1963): Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. International Association of Scientific Hydrology Publication, 63, 52-62.
- HAÖ – Hydrologischer Atlas Österreich (2005): Mittlere jährliche aktuelle Gebietsverdunstung aus der Wasserbilanz, Karte 3.3, Österreichischer Kunst und Kulturverlag und Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- Havnø, K., M. N. Madsen and J. Dørge (1995): MIKE 11—a generalized river modelling package. Chapter 21 in: V. P. Singh (Ed.) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, pp. 733-782
- Hawkins, R.H., R. Jiang, D. E. Woodward, A. T. Hjelmfelt and J. E. VanMullen (2002): Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio, Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada
- Hebenstreit, K. (2000): Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hydrologie alpiner Einzugsgebiete. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 160
- Heilig, M. (2012): Dauerstufenzeitverteilung Trattenbach/Schlaggraben, St. Corona am Wechsel, Bromberg, Unveröffentlichter Projektsbericht für HD Niederösterreich
- Helfricht, K., L. Hartl, R. Koch, C. Marty and M. Olefs (2018): Obtaining sub-daily new snow density from automated measurements in high mountain regions, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 2655-2668.
- Hessel, R., V. Jetten and Z. Guanghai (2003): Estimating Manning’s n for steep slopes, *Catena*, 54 (1–2), 77–91
- Hewlett, J., Hibbert, A. (1967): Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: *Forest Hydrology*, pp. 275–290.
- Hoffmann, L. (1970): Die Geröllfracht in Wildbächen. Mitteilungen der Forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Wien, 88, 108–112
- Hofstätter, M., J. Jacobeit, M. Homann, A. Lexer, B. Chimani, A. Phillipp, C. Beck und M. Ganekind (2015): WETRAX – WEather Patterns, Cyclone TRacks and related precipitation Extremes. Großflächige Starkniederschläge im Klimawandel in Mitteleuropa. Projektendbericht. Geographica Augustana 19, Augsburg
- Holzeis F., C. Kopeinig, P. Mandl P. und J. Moser (2014): Wasser in Kärnten. Eine hydrologische Bilanz (Teil 1: Wasserhaushalt; Teil 2: Bemessungsgrundlagen). Amt der Kärntner Landesregierung, Klagenfurt
- Hoppe, H. (2006): Unsicherheit von Grundlagendaten im Rahmen integrierter Planungen urbaner Abwasserentsorgungssysteme. Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum Nr. 51, Ruhruniversität Bochum
- Hochreiter, H. (2004): WLW Wildbachaufnahmeblatt Weerbach
- Hrachowitz, M., O. Fovet, L. Ruiz, T. Euser, S. Gharari, R. Nijzink, ... and C. Gascuel-Oudou (2014): Process consistency in models: The importance of system signatures, expert knowledge, and process complexity. *Water Resources Research*, 50 (9), 7445–7469
- HSGSim (2008): Integrierte Modellierung von Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer – HSG-Leitfaden der Arbeitsgruppe Integrierte Modellierung. 1. Auflage, Hochschulgruppe „Erfahrungsaustausch Dynamische Simulation in der Siedlungswasserwirtschaft (HSGSim). Arbeitsgruppe Integrierte Modellierung
- Hübl, J. (2009): Ereignisdokumentation Prozesse: Wasser, Universitätskurs Ereignisdokumentation, Hrsg. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien
- Hübl, J., G. Bunza, K. Hafner und W. Klaus (2003): Stummer Zeugen Katalog. In: Projektteam ETAlp (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft), Kompendium zu ETAlp-Erosion, Transport in alpinen Systemen, 48, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien

- Hübl, J., J. Eisl, G. Kundela, D. Hohl, K. Karagiorgos, B. Hofer, S. Tschärner, M. Wagner und U. Savora (2012): IAN Report 143: Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Wölzerbach; Band 2: Ereignisanalyse; Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien
- Hübl, J., H. Kienholz and A. Loipersberger (2002): DOMODIS – Documentation of Mountain Disasters: State of the discussion in the European Mountain Areas, Handbuch 1. Schriftenreihe 1, Int. Forschungsges. INTERPRAEVENT, Klagenfurt
- Illgen, M. (2009): Das Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen und seine urbanhydrologische Quantifizierung. PhD Thesis, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern
- Ingenieurbüro Wölfler ZT GmbH (2008): Gewässerentwicklungskonzept Gasteiner Ache, Gefahrenzonenplanung Bad Hofgastein, Technischer Bericht (GZ – 2717)
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 1535 pp.
- ISO (2008): ISO/IEC Guide 98-3, Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)
- Izzard, C. F. (1946): Hydraulics of runoff from developed surfaces, in Proc. Highway Research Board. Proc., 26, 129–150
- Jiang, R. (2001): Investigation of Runoff Curve Number Initial Abstraction Ratio, The University of Arizona, Master Thesis, 120 pp.
- Jin, M. and D.-L. Zhang (2002): Observed variations of leaf area index and its relationship with surface temperatures during warm seasons <http://www.atmos.umd.edu/~dalin/jin-zhang-LAI-Tsfc-map02.pdf>
- Jonas, T., C. Marty and J. Magnusson (2009): Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology*, 378, 161–167
- Kammerlander, J. (2011): Integrale Gefahrenanalyse Höttinger Bach. Diplom-/Masterarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, 206 S.
- Kirnbauer, R., S. Achleitner, J. Schöber, J. Asztalos und H. Schönlaub (2009): Hochwasservorhersage Inn: Modellierung der Gletscherabflüsse. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 86, 109–130, Wien
- Kirnbauer, R., G. Blöschl and D. Gutknecht (1994): Entering the era of distributed snow models. *Nordic Hydrology*, 25, 1–24
- Kite, G. and P. Droogers (eds.) (2000): Comparing actual evapotranspiration from satellite data, hydrological models and field data. Special Issue, *Journal of Hydrology*, 229 (1–2), 1–100
- Klammler, G. and J. Fank (2014): Determining water and nitrogen balances for beneficial management practices using lysimeters at Wagna test site (Austria). *Science of the Total Environment*, 499, 448–462
- Klebinder, K., B. Kohl, A. Maldet, G. Markert und B. Sotier (2010): Bewertung und Quantifizierung der Auswirkung von Versiegelungen auf den Oberflächenabfluss. BfW, Innsbruck
- Klebinder, K., B. Kohl, A. Maldet, G. Markart, M. Pittbacher, B. Sotier und L. Stepanek (2011): Bewertung und Quantifizierung der Auswirkung von Versiegelungen auf die Abflusssituation in Wildbacheinzugsgebieten. In: Hydrologie & Wasserwirtschaft – von der Theorie zur Praxis. G. Blöschl und R. Merz (Hrg.): Beiträge zum Tag der Hydrologie 2011, 24./25. März 2011. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 30.11, 339–340
- Klebinder, K., B. Sotier, A. Eder, P. Strauss, G. Markart, H. Aigner, G. Holzinger und C. Kramer (2012): Hydrologische Bodenkennwerte und Abflussreaktionstypen für Niederösterreich. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 76 (169), 114–123
- Kleidorfer, M. und W. Rauch (2009): Modellkalibrierung und Bewertung der Qualität von Simulationsergebnissen, In Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft der TU Graz, Band 56, A1–A38, ÖWAV-/TU Graz-Seminar „Optimierte Bemessung von Mischwasserentlastungsanlagen“, 30. Juni 2009, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau
- Kleidorfer, M., A. Deletic, T. D. Fletcher and W. Rauch (2009): Impact of input data uncertainties on urban stormwater model parameters. *Water Science and Technology*, 60 (6), 1545–1554
- Kleidorfer, M., S. Fach und W. Rauch (2008): Hinweise zur Kalibrierung von hydrologischen Modellen für die Anwendung von ÖWAV-Regelblatt 19/neu. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 209, J1–J24

- Kleindienst, H. (1996): Erweiterung und Erprobung eines anwendungsorientierten hydrologischen Modells zur Gangliniensimulation in kleinen Wildbacheinzugsgebieten Diplomarbeit, Institut für Geographie, Ludwig-Maximilians-Universität München
- Kling, H., H. P. Nachtnebel und J. Fürst (2005): Mittlere jährliche aktuelle Gebietsverdunstung aus der Wasserbilanz. Karte 3.3, Hydrologischer Atlas Österreichs, Erläuterungstext zur Karte. In: BMLFUW (2005): Hydrologischer Atlas Österreichs, 2. Lieferung, Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- Kohl, B. (2011): Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST – Entwicklung eines praktikablen Modells zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten unter Einbeziehung verbesserter Felddaten. Dissertation an der Universität Innsbruck. 263 S.
- Kohl, B. und G. Markart (2010): Von der Starkregensimulation zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen kleiner Einzugsgebiete. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 28, 157–170
- Kohl, B. und L. Stepanek (2005): ZEMOKOST – neues Programm für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen. BFW-Praxisinformation, Wien, (8), 21–22
- Kohl, B., F. Perzl, G. Markart, K. Klebinder, H. Pirkl, F. Riedl und L. Stepanek (2009): Hochwasser Paznaun. 2005: Wald – Abfluss – Potentiale. Bericht der Wildbach- und Lawinenverbauung, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- Kohl, B., M. Fuchs, G. Markart and G. Patzelt (2001): Heavy rain on snow cover. *Annals of Glaciology*, 32, 33–38
- Kohl, B., K. Klebinder, G. Markart, F. Perzl, H. Pirkl, F. Riedl und L. Stepanek (2008): Analyse und Modellierung der Waldwirkung auf das Hochwasserereignis im Paznauntal vom August 2005. In: Conference Proceedings – Internationales Symposium Interprävent 2008, Dornbirn, (2), 505–516
- Kohl, B., G. Markart, K. Klebinder und B. Sotier (2010): A practicable approach for evaluating runoff changes in ungauged basins. Book of Abstracts: 13th Biennial Conference ERB 2010: Hydrological responses of small basins to a changing environment. Seggau Castle, Austria, 49–52
- Kohl, B., D. Walter, M. Rössel, G. Reiter (2012): Höttinger Graben – Ergänzungen zur Hydrologie und zur Erosionsdynamik; Projektbericht im Auftrag des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung BMLFUW. 41 S.
- Komma, J., C. Reszler, G. Blöschl and T. Haiden (2007): Ensemble prediction of floods – catchment non-linearity and forecast probabilities. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 431–444
- Komma, J., G. Blöschl and C. Reszler (2008): Soil moisture updating by Ensemble Kalman Filtering in real-time flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 357, 228–242
- Komma, J., G. Blöschl und C. Reszler (2006b): Nachführung mittels Ensemble Kalman-Filter. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 199, 243–258, Technische Universität Wien
- Komma, J., Reszler, Ch., Blöschl, G. und T. Haiden (2006a): Ensembleprognosen von Hochwasserabflüssen. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 199, 279–294, Technische Universität Wien
- König, M., J.-G. Winther and E. Isaksson (2001): Measuring snow and glacier ice properties from satellite. *Reviews of Geophysics*, 39, 1–27
- Krajci, P., R. Kirnbauer, J. Parajka, J. Schöber and G. Blöschl (2017): The Kühtai data set: 25 years of lysimetric, snow pillow, and meteorological measurements. *Water Resources Research*, 53, 5158–5165
- Lanza, L. G. and L. Stagi (2009): High resolution performance of catching type rain gauges from the laboratory phase of the WMO Field Intercomparison of Rain Intensity Gauges. *Atmospheric Research*, 94 (4), 555–563
- Lindström, G., B. Johansson, M. Persson, M. Gardelin, S. Bergström (1997): Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201(1–4): 272–288.
- LISA (2012): <http://www.landinformationssystem.at/index.php/project.html>
- Löhmannsröben, R., O. Altfeld, G. Bunza, M. Eidt, A. Fischer, P. Jürging, T. Schauer und R. Ziegler (2000): Geländeanleitung zur Abschätzung des Abfluss- und Abtragsgeschehens in Wildbacheinzugsgebieten. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Materialien Nr. 87

- Lorenz, P. und G. Skoda (2002): Bemessungsniederschläge auf der Fläche für kurze Dauerstufen ($D \leq 12$ Stunden) mit inadäquaten Daten. In: Gutknecht, D. (Hrsg.): Niederschlag-Abfluss-Modellierung – Simulation und Prognose. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 164, 179–200
- Lutz, W. (1984): Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. Mitteilung Nr. 24 des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe
- Maniak, U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft, Eine Einführung für Ingenieure, 6., neu bearb. Aufl., Springer Verlag, ISBN 978-3-642-05395-5
- Markart, G., A. Römer, G. Bieber, H. Pirkl, K. Klebinder, C. Hörfarter, A. Ahl, A. Ita, B. Jochum, B. Kohl, G. Meissl, K. Motschka, D. Ottowitz, I. Schattauer, B. Sotier, M. Strasser, K. Suttinger und E. Winkler (2013): Abschätzung der Bandbreiten von Fließgeschwindigkeiten des oberflächennahen Zwischenabflusses in alpinen Einzugsgebieten. Endbericht – 3. Projektjahr an die Österreichische Akademie der Wissenschaften (ÖAW), Nationalkomitee Hydrologie Österreichs (IHP), ISBN-Online: 978-3-7001-7392-2; doi:10.1553/Shallow
- Markart, G., Kohl, B., Sotier, B., Schauer, T., Bunza, G. und R. Stern (2004): Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW-Dokumentation Nr. 3, Bundesamts und Forschungszentrums für Wald, Wien, 83 S.
- Markart, G., B. Kohl, B. Sotier, T. Schauer, G. Bunza und R. Stern (2006): Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes bei Starkregen – Grundzüge und erste Erfahrungen. ÖWAV-Seminar „Methoden der hydrologischen Regionalisierung“ im Lebensministerium, 18.-19.5.2006, Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 197, 159–178
- Mein, R. G. and C. L. Larson (1973): Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, 9 (2), 384–394
- Melli, E. (1924): Die Dimensionierung städtischer Kanäle. *Schweizerische Bauzeitung*, 12, 137–141
- Merz, R. (2002): Understanding and estimating flood probabilities at the regional scale. D. Gutknecht (Hrg.): Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 181, ISBN 3-85234-072-1
- Merz, R. und G. Blöschl (2002): Marktübersicht und Beispiele – Software für die NA-Modellierung. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 164, 223–242
- Merz R. and G. Blöschl (2003): A process typology of regional floods. *Water Resources Research*, 39 (12), article number 1340.
- Merz, R. and G. Blöschl (2004): Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 287, 95–123
- Merz, R. und G. Blöschl (2006): Ereignisbezogene Abflussbeiwerte. Karte 5.9, Hydrologischer Atlas Österreich. Österreichischer Kunst und Kulturverlag und Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- Merz, R. und G. Blöschl (2008a): Informationserweiterung zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52 (6), 300–309
- Merz, R. and G. Blöschl (2008b): Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information. *Water Resources Research*, 44 (8), article number W08432
- Merz, R., Parajka, J., Reszler, Ch. und Blöschl, G. (2004): Analyse regionaler Ereignisabflussbeiwerte in Österreich. Projektbericht im Auftrag des BMLFUW, Technische Universität Wien, Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft
- Merz, R., G. Blöschl und J. Parajka (2006): Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50 (1), 2–11
- Merz, R., G. Blöschl und G. Humer (2008a): Hochwasserabflüsse in Österreich – das HORA Projekt. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 60 (9–10), 129–138
- Merz R., G. Blöschl and G. Humer (2008b): National flood discharge mapping in Austria. *Natural Hazards*, 46 (1), pp. 53-72.
- Merz, R., J. Parajka and G. Blöschl (2011): Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses. *Water Resources Research*, 47, W02531, doi:10.1029/2010WR009505

- Monteith, J. (1965): Evaporation and environment. Symposium of the Society of Experimental Biology, 19, 205–224
- Morgali, J. R. and R. K. Linsley (1965): Computer Analysis of Overland Flow. *Journal of the Hydraulics Division ASCE*, 91, HY 5, 81–100
- Morgenstern, Y. (2007): Analyse und Konzeption von Messstrategien zur Erfassung der bodenhydraulischen Variabilität. Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Lehrstuhl für Hydrologie
- Moser, J. (2016): Hydrologische Kennwerte von Fließgewässern in Kärnten. Amt der Kärntner Landesregierung, Klagenfurt
- Moser, J., C. Kopeinig and K. Rohner (2016): Practical experience with the Flood scenario catalogue Carinthia. Practical experience with the Flood scenario catalogue Carinthia, a handbook for flood forecast and warning. Praktische Erfahrungen mit dem Hochwasserszenarien-katalog Kärnten, ein Handbuch zur Hochwasserprognose und -warnung. Proc. Interpraevent, Luzern
- Müller, G. (2006): Datenprüfung und -verfügbarkeit beim Hydrographischen Dienst in Österreich. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Heft 197, 55–69
- Müller, G. und A. Münch (2000): Landnutzungsänderungen und Wasserbilanz – Modellierung des Wasserhaushalts mit dem Modell Akwa-m, Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Heft 164, 7–17
- Münch, A. (1994): Wasserhaushaltsberechnungen für Mittelgebirgseinzugsgebiete unter Berücksichtigung einer sich ändernden Landnutzung. Dissertation, TU Dresden, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften
- Naef, F., S. Scherrer und C. Zurbrügg (1998): Grosse Hochwasser – Unterschiedliche Reaktionen von Niederschlägen. Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES, Blatt 5.7
- Nash, J.E. (1957): The form of the instantaneous unit hydrograph. In: General Assembly of Toronto, Vol. III Surface Waters, Prevision, Evaporation, pp. 114-121, IAHS Publ. No. 45
- Nester, T., J. Komma, A. Viglione and G. Blöschl (2012a): Flood forecast errors and ensemble spread – a case study, *Water Resources Research*, 48, W10502, 19 pp
- Nester, T., R. Kirnbauer, J. Parajka and G. Blöschl (2012b): Evaluating the snow component of a flood forecasting model, *Hydrology Research*, 43, 762–779
- Neumayr, G. (1999): Band 1: Verbauungsprojekt Angerbach zum Schutz des Ortteils Lafen, Gemeinde Bad Hofgastein, unter Berücksichtigung des Kraftwerkseinflusses, Masterarbeit, Universität für Bodenkultur Wien
- Ohmura, A. (2001): Physical basis for the temperature-based melt-index method. *Journal of Applied Meteorology*, 40 (4), 753–761
- ÖNORM (2007): CEN ISO/TS 25377 – Leitfaden zu Messunsicherheiten in der Hydrometrie (HUG) (ISO/TS 25377:2007)
- Österreichisches Normungsinstitut (2009): ON-Regel 24800 – Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung, Wien
- ÖWAV (2007a): ÖWAV-Leitfaden „Niederschlagsdaten zur Anwendung der ÖWAV-Regelblätter 11 und 19“. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien
- ÖWAV (2007b): ÖWAV-Regelblatt 19 „Richtlinien für die Bemessung von Mischwasserentlastungen“, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), 48 S.
- ÖWAV (2009): ÖWAV-Regelblatt 11: Richtlinien für die abwassertechnische Berechnung und Dimensionierung von Abwasserkanälen. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), 96 S.
- ÖWAV (2016): ÖWAV-Arbeitsbehelf 47 „Bodenfunktionen für die Wasserwirtschaft.“ Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Wien
- Parajka, J. and G. Blöschl (2008b): The value of MODIS snow cover data in validating and calibrating conceptual hydrologic models, *Journal of Hydrology*, 358, 240–258
- Parajka, J. and G. Blöschl (2008a): Spatio-temporal combination of MODIS images – potential for snow cover mapping. *Water Resources Research*, 44, article number W03406
- Parajka, J. und G. Blöschl (2009): Schneebeobachtungen und Simulationen in Österreich für hydrologische Zwecke. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 86, 79–91, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien

- Parajka, J. and G. Blöschl (2012): MODIS-based Snow Cover Products, Validation, and Hydrologic Applications. Chapter 9 in Multi-scale Hydrological Remote Sensing: Perspectives and Applications, ed. By N.B. Chang and Y. Hong, CRC Press, Boca Raton, 185–212
- Parajka, J., R. Merz and G. Blöschl (2003): Estimation of daily potential evapotranspiration for regional water balance modeling in Austria. In 11th International Poster Day and Institute of Hydrology Open Day „Transport of Water, Chemicals and Energy in the Soil–Crop Canopy–Atmosphere System”. Slovak Academy of Sciences, Bratislava, 299–306
- Parajka J., R. Merz und G. Blöschl (2005a): Regionale Wasserbilanzkomponenten für Österreich auf Tagesbasis. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 57 (3–4), 43–56
- Parajka J., R. Merz and G. Blöschl (2005b): A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 9, 157–171
- Parajka, J., R. Merz and G. Blöschl (2007): Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modeling – Case study in 320 Austrian catchments. *Hydrological Processes*, 21, 435–446
- Parajka, J., J. Jansa und G. Blöschl (2009): Bestimmung des Schneevorrates in Einzugsgebieten mittels Fernerkundungsmethoden. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 61 (7–8), 125–131
- Parajka, J., P. Haas, R. Kirnbauer, J. Jansa and G. Blöschl (2012): Potential of time-lapse photography of snow for hydrological purposes at the small catchment scale. *Hydrological Processes*, 26, 3327–3337
- Parajka, J., et al. (2013): Predictions of Runoff Hydrographs in Ungauged Basins. Chapter 10 in: G. Blöschl, M. Sivapalan, T. Wagener, A. Viglione, H. Savenije (eds.): Runoff Prediction in Ungauged Basins – Synthesis across Processes, Places and Scales. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 227–360
- Peschke, G., C. Etzenberg, G. Müller, J. Töpfer und S. Zimmermann (1999): Das wissenschaftliche System FLAB – Ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflussbildung. IHI-Schriften 10, Int. Hochschulinstitut Zittau
- Pirkl, H. (2012): Untergrundabhängige Abflussprozesse. Kartierung und Quantifizierung für das Bundesland Tirol. Flächendeckende Aufnahme Osttirols. Bericht an den Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol und Amt der Tiroler Landesregierung, Abt. Hydrographie und Hydrologie
- Pirkl, H., G. Markart und B. Kohl (2000): Von Fachkartierungen zu flächenhaften Prozessdarstellungen – Aggregierungsschritte als Weg. Internationales Symposium INTERPRAEVENT, Villach, Juni 2000, Tagungspublikation, Band 3, 259–270
- Pirkl, H. und Th. Sausgruber (2015): Handbuch zur qualitativen und quantitativen Erfassung untergrundabhängiger Abflüsse in Wildbacheinzugsgebieten. Unveröffentlichter Bericht WLW, Wien/Innsbruck)
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek and N. Miller (1983): Green-Ampt infiltration parameters from soils data, *Journal of Hydraulic Engineering*, 109 (1), 62–70
- Refsgaard, J. C. and B. Storm (1995): MIKE SHE. Chapter 23 in: V. P. Singh (Ed.) Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, pp. 809-846
- Reszler, Ch. and J. Fank (2016): Unsaturated zone flow and solute transport modelling with MIKE SHE: model test and parameter sensitivity analysis using lysimeter data. *Environmental Earth Sciences*, 75 (3), 253
- Reszler, Ch., J. Komma, G. Blöschl und D. Gutknecht (2006a): Identifikation von Modellparametern in detaillierten Modellen. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Band 199, 259–278
- Reszler, Ch., J. Komma, G. Blöschl und D. Gutknecht (2006b): Ein Ansatz zur Identifikation flächendetaillierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50 (5), 220–232
- Reszler, Ch., Blöschl G. und J. Komma (2008a): Identifying runoff routing parameters for operational flood forecasting in small to medium sized catchments, *Hydrological Sciences Journal*, 53 (1), 112–129
- Reszler, Ch., J. Komma, G. Blöschl und D. Gutknecht (2008b): Dominante Prozesse und Ereignistypen zur Plausibilisierung flächendetaillierter Niederschlag-Abflussmodelle. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52 (3), 120–131

- Richard, F. und P. Lüscher (1983): Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. Lokalförmungen. Bd. 1–4, Hrsg.: Bosshard, W., Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf
- Richards, L. A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1, 318–33
- Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 194, Selbstverlag des DWD, Offenbach a. M.
- Rickenmann, D. (1996): Fließgeschwindigkeiten in Wildbächen und Gebirgsflüssen. *Wasser, Energie, Luft*, 88 (11/12), 298–304
- Rickli, C. und F. Forster (1997): Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. *Schweiz. Zeitschr. f. Forstwesen*, 148 (5), 367–385
- Rogger, M., B. Kohl, H. Pirkl, M., Hofer, R. Kirnbauer, R. Merz, J. Komma, A. Viglione und G. Blöschl (2011a): HOWATI – HochWasser Tirol. Ein Beitrag zur Harmonisierung von Bemessungshochwassern in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63 (7–8), 153–161
- Rogger, R., R. Merz, A. Viglione, R. Kirnbauer and G. Blöschl (2011b): Projektsbericht HOWATI - Hochwasser Tirol, Teil: Ergebnisse der stochastischen Modellierung der Leiteinzugsgebiete, Technische Universität Wien. Erhältlich beim Hydrographischen Dienst Tirol.
- Rogger, M., B. Kohl, H. Pirkl, A. Viglione, J. Komma, R. Kirnbauer, R. Merz and G. Blöschl (2012a): Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria – Do they tell a consistent story?, *Journal of Hydrology*, 456–457, 30–43, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.05.068
- Rogger, M., H. Pirkl, A. Viglione, J. Komma, B. Kohl, R. Kirnbauer, R. Merz and G. Blöschl (2012b): Step changes in the flood frequency curve: Process controls, *Water Resources Research*, 48, W05544, doi:10.1029/2011WR011187
- Rogger, M., A. Viglione, J. Derx and G. Blöschl (2013): Quantifying effects of catchments storage thresholds on step changes in the flood frequency curve. *Water Resources Research*, 49, 6946–6958, doi:10.1002/wrcr.20553
- Rogger, M., M. Agnoletti, A. Alaoui, J.C. Bathurst., G. Bodner, M. Borga, V. Chaplot, F. Gallart, G. Glatzel, J. Hall, J. Holden, L. Holko, R. Horn, A. Kiss, S. Kohnova, G. Leitinger, B. Lennartz, J. Parajka, R. Perdigão, S. Peth, L. Plavcová, J.N. Quinton, M. Robinson, J.L. Salinas, A. Santoro, J. Szolgay, S. Tron, J.J.H. van den Akker, A. Viglione and G. Blöschl (2017): Land-use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research. *Water Resources Research*, 53, 5209–5219, doi:10.1002/2017WR020723
- Rossmann, L. A. (2007): Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.0, p. 265, EPA – United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio (USA)
- Rubel, F. (1999): Correction of daily rain gauge measurements in the Baltic Sea drainage basin. *Nordic Hydrology*, 30, 191–208
- Rutschmann, P., J. Nemmert und H. Egger (2007): Überprüfung von Schlüsselkurven im Hochwasserbereich durch numerische 3D Rechnungen, Pegel Hopfgarten/Schwarzach. Endbericht des IWI im Auftrag des Hydrographischen Dienstes Tirol, Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Wasserbau
- Rutter, A. J. and A. J. Morton, (1977): A predictive model of rainfall interception in forests. III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. *Journal of Applied Ecology*, 567-588.
- de Saint-Venant, A. J. C. (1871): Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences. Paris.*, 73, 147-154, 237-240.
- Salazar, S., F. Francés, J. Komma, T. Blume, T. Francke, A. Bronstert and G. Blöschl (2012): A comparative analysis of the effectiveness of flood management measures based on the concept of „retaining water in the landscape“ in different European hydro-climatic regions, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 3287–3306, doi:10.5194/nhess-12-3287-2012
- Salzer, J. (1886): Über den Stand der Wildbachverbauung in Oesterreich. Verlag des krainisch-küstenlaendischen Forstvereins, Wien

- Schaap, M. G., F. J. Leij and M. T. van Genuchten (2001): ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251 (3–4), 163–176
- Schelle, H., S. C. Iden, J. Fank and W. Durner (2012): Inverse Estimation of Soil Hydraulic and Root Distribution Parameters from Lysimeter Data. *Vadose Zone Journal*, 11 (4) doi:10.2136/vzj2011.0169
- Scherrer AG (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Hrsg. vom Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
- Scherrer, S. and F. Naef (2003): A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. *Hydrological Processes*, 17, 391–401. doi: 10.1002/hyp.1131
- Scherrer, S., N. Demuth and A. Meuser (2002): A procedure for the identification of dominant runoff processes by field investigations to delineate the relevant contributing area for flood modelling. In Spreafico and Weingartner (eds.): International Conference on Flood Estimation. Conference Proceedings. CHR/KHR Report II-17, Lelystad, NL, 2002, 219–228
- Schneeberger, K., M. Huttenlau and J. Stötter (2012): A seasonality analysis of flood peaks as basis for flood risk analyses in two alpine catchments, 3rd STAHY International Workshop on statistical methods for hydrology and water resources management, Tunis, Tunisia, pp. 11.
- Schöber, J. (2014): Improved snow and runoff modelling of glacierized catchments for flood forecasting. Dissertation, Universität Innsbruck, 246 S.
- Schöber, J., S. Achleitner, R. Kirnbauer, F. Schöberl and H. Schönlaub (2010): Hydrological modelling of glacierized catchments focussing on the validation of simulated snow patterns – applications within the flood forecasting system of Tyrolean river Inn. *Advances in Geoscience*, 27, 99–109
- Schöner, W., R. Böhm und K. Haslinger (2011): Klimaänderung in Österreich – hydrologisch relevante Klimaelemente. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63 (1–2), 11–20
- Schulla, J. (2017): Model Description WaSiM 2017. Technical report, 347pp. http://www.wasim.ch/en/products/wasim_description.htm
- Schulla, J. (1996): Hydrologische Modellierung von Flußgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Dissertation, Zürcher Geogr. Schriften, Heft 69, ETH Zürich, Geogr. Institut
- SCS (Soil Conservation Service)-USDA (1972): Estimation of direct runoff from storm rainfall, National Engineering Handbook. Section 4 – Hydrology, 10.1–10.24
- Seger, M. (2001): Rauminformationssystem Österreich – ein digitaler thematischer Datensatz des Staatsgebietes. *VGI: Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 89/2
- Sevruk, B. (1985): Correction of precipitation measurements, summary report. In: Sevruk, B. (ed.): Proceedings of the WMO/IAHS/ETH Workshop on the Correction of Precipitation measurements, Zurich, 13–23
- Sevruk, B., Ondrás, M. and B. Chvila (2009): The WMO precipitation measurement intercomparisons. 7th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, Atmospheric Research, 92 (3), 376–380
- Sherman, L. K. (1932) Streamflow from rainfall by unit-graph method. *Engineering News Record* 108, 501–505
- Singh, V. P. (ed.) (1995): Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 1130 pp.
- Singh, V. P. and D. K. Frevert (Ed.) (2001 a): Mathematical models of small watershed hydrology, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 972 pp.
- Singh, V. P. and D. K. Frevert (Ed.) (2001 b): Mathematical models of large watershed hydrology, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 914 pp.
- Sitzenfrei, R., M. Kleidorfer, G. Arming und W. Rauch (2015): Untersuchungen zur Auslegung eines Retentionsbeckens an der Schnittstelle zwischen urbanen und natürlichen Einzugsgebieten. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 67 (7–8), 325–332, doi:10.1007/s00506-015-0252-9

- Sivapalan, M., G. Blöschl, R. Merz and D. Gutknecht (2005): Linking flood frequency to long-term water balance: incorporating effects of seasonality. *Water Resources Research*, 41, article number W06012.
- Sivapalan, M. and G. Blöschl (2017): The growth of hydrological understanding: Technologies, ideas, and societal needs shape the field. *Water Resources Research*, 53, 8137–8146, doi: 10.1002/2017WR021396
- Skoda, G., V. Weilguni und T. Haiden (2007): Konvektive Starkniederschläge – Niederschlag in 15, 60 und 180 Minuten. In: BMLFUW (2007): HAÖ – Hydrologischer Atlas Österreichs. 3. Lieferung 2007. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- Steinacker, R., M. Ratheiser, B. Bica, B. Chimani, M. Dorninger, W. Grepp, C. Lotteraner, S. Schneider and S. Tschannett (2006): Downscaling meteorological information over complex terrain with the fingerprint technique by using a priori knowledge. *Monthly Weather Review*, 134, 2758–2771
- Stepanek, L, Kohl, B. und Markart, G. (2004): Von der Starkregensimulation zum Spitzenabfluss. Internationales Symposium Interpraevent 2004 – Garda/Italien, Tagungspublikation, Band 1, I/101–112
- Stiny, J. (1931): Geologische Grundlagen der Verbauung der Geschiebeherde in Gewässern, Springer Verlag, Wien
- Strasser, U. and T. Marke (2010): ESCIMO.spread – a spreadsheet-based point snow surface energy balance model to calculate hourly snow water equivalent and melt rates for historical and changing climate conditions, *Geoscientific Model Development Discussions*, 3, 627–649
- Sui, J. and G. Koehler (2001): Rain-on-snow induced flood events in Southern Germany. *Journal of Hydrology*, 252 (1), 205–220
- Ungersböck, M., I. Auer und F. Rubel (2001): Zur Korrektur des systematischen Fehlers bei der Niederschlagsmessung. Deutsch-Österreichisch-Schweizer Meteorologentag DACH 2001
- US Army Corps of Engineers (2000): Hydrologic Modeling System HEC – HMS, Technical Reference Manual. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center
- USDA (1986): Urban Hydrology for Small Watersheds – TR-55, United States Department of Agriculture – Natural Resources Conservation Service – Conservation Engineering Division, Washington, D.C, USA
- Viglione, A. and G. Blöschl (2009): On the role of storm duration in the mapping of rainfall to flood return periods, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 205–216
- Viglione, A., M. Rogger, H. Pirkl, J. Parajka and G. Blöschl (2018) Conceptual model building inspired by field-mapped runoff generation mechanisms. *Journal of Hydrology and Hydro-mechanics*, 66 (3) 303–315 DOI: 10.2478/johh-2018-0010
- Viglione, A., R. Merz and G. Blöschl (2009): On the role of the runoff coefficient in the mapping of rainfall to flood return periods, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13 (5), 577–593
- Viviroli, D., M. Zappa, J. Gurtz and R. Weingartner, R. (2009): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre-and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software*, 24(10), 1209-1222.
- Wahren, A., K. Schwärzel, K.H. Feger and A. Münch (2009): Land-use effects on flood generation – considering soil hydraulic measurements in modelling. *Advances in Geosciences*, 21, 99–107
- Walter, I. A., R. G. Allen, R. Elliott, D. Itenfisu, P. Brown, M. E. Jensen, B. Mecham, T. A. Howell, R. L. Snyder, S. Eching, T. Spofford, M. Hattendorf, D. Martin, R. H. Cuenca and J. L. Wright (2002): The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Rep. Task Com. on Standardized Reference Evapotranspiration July 9, 2002, EWRI-Am. Soc. Civil. Engr., Reston, VA, USA
- Wasserbuch Tirol Postzahl 3/573 via TIRIS (<https://www.tirol.gv.at/statistik-budget/tiris/>).
- Weilguni, V. (2006): Regionalisierung des Niederschlags. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Heft 197, 71–92
- Weilguni, V. (2009): Bemessungsniederschläge in Österreich. Wiener Mitteilungen Wasser – Abwasser – Gewässer, Heft 216, 71–84

- Western, A. W., R. B. Grayson, G. Blöschl and D. J. Wilson (2003): Spatial variability of soil moisture and its implications for scaling. In: Y. Pachepsky, D. E. Radcliffe and H. M. Selim (eds.): *Scaling methods in soil physics*. CRC Press, Boca Raton, 119–142
- Wetterhall, F., I. G. Pechlivanidis, M.-H. Ramos, A. Wood, Q. J. Wang, E. Zehe and U. Ehret (Eds) (2017): Sub-seasonal to seasonal hydrological forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, Special Issue
- WKEV (2006): 478. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Erhebung des Wasserkreislaufes in Österreich (Wasserkreislaufferhebungsverordnung – WKEV). Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, Jg. 2006, 14. Dezember 2006
- WMO (1994): Guide to Hydrological Practices. WMO-No. 168, 5th edition, Genf
- WMO (2006): Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO-No. 8, 7th edition, WMO, Geneva (available at: https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.html)
- WMO (2009): Instruments and Observing Methods. Report No. 99, WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges 2007-2009, WMO Technical Documents No. 1504
- Wösten, J. H. M., Ya. A. Pachepsky and W. J. Rawls (2001): Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics, *Journal of Hydrology*, 251 (3–4), 123–150
- Wundt, W. (1953): *Gewässerkunde*, Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg
- ZAMG/TU-Wien Studie (2011): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Studie für Bund und Länder. Endbericht. BMLFUW. 486 S. https://www.bmlfuw.gv.at/dam/jcr:00079405-0320-4544-b6a4-320325dcfd86/Anpassungsstrategien%20Klimawandel_Langfassung%5B1%5D.pdf
- Zehe, E., H. Elsenbeer, F. Lindenmaier, K. Schulz and G. Blöschl (2007): Patterns of predictability in hydrological threshold systems. *Water Resources Research*, 43, article number W07434

ÖWAV-REGELWERK

Nähere Informationen zu den **Preisgruppen** und **Bezugsmöglichkeiten** finden Sie am Ende der Publikationsliste.

A) ÖWAV-Regelblätter

Abwassertechnik und Gewässerschutz

ÖWAV-Regelblatt 1	Abwasserentsorgung im Gebirge. 3., vollständig überarbeitete Auflage. 2000. (<i>Printversion vergriffen, nur mehr digital erhältlich</i>)	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWWV-Regelblatt 2	Das Fachpersonal auf Abwasserreinigungsanlagen – Merksätze für Gemeinden und Abwasserverbände. 1978.	<i>vergriffen</i>
ÖWWV-Regelblatt 3	Hinweise für das Ableiten von Abwasser aus Schlachthanlagen und fleischverarbeitenden Betrieben in eine öffentliche Abwasseranlage. Überarb. Neuausgabe 1992.	<i>Preisgruppe 1</i>
ÖWAV-Regelblatt 4	Hinweise für das Einleiten von Abwasser aus Betrieben in eine öffentliche Kanalisationsanlage. 2., vollständige überarbeitete Auflage. 2001.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWWV-Regelblatt 5	Richtlinien für die hydraulische Berechnung von Abwasserkanälen. 1980.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 6	Fremdüberwachung von biologischen Abwasserreinigungsanlagen. Teil 1: Fremdüberwachung gemäß 1. AEV für kommunales Abwasser. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 1998.	<i>Preisgruppe 1</i>
	Teil 2: Gesamtprüfung. 2000.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Regelblatt 7	Mindestausrüstung für die Eigen- und Betriebsüberwachung biologischer Abwasserreinigungsanlagen (inkl. Indirekteinleiterüberwachung). 4., vollständig überarbeitete Auflage. 2003.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 8	Hinweise für das Einleiten von Abwasser aus oberflächenbehandelnden Betrieben in eine öffentliche Abwasseranlage oder einen Vorfluter. Neuausgabe 1993.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Regelblatt 9	Richtlinien für die Anwendung der Entwässerungsverfahren. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2008.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWWV-Regelblatt 10	Richtlinien für die Ausführung von Abwassermeßschächten. 1981.	<i>vergriffen</i>
ÖWAV-Regelblatt 11	Richtlinien für die abwassertechnische Berechnung und Dimensionierung von Abwasserkanälen. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2009.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWWV-Regelblatt 12	Hinweise für das Einleiten von Abwasser aus milchbe- und -verarbeitenden Betrieben in eine Abwasseranlage. 1982.	<i>vergriffen</i>
ÖWAV-Regelblatt 13	Betriebsdaten von Abwasserreinigungsanlagen – Erfassung, Protokollierung und Auswertung. 3., vollständig überarbeitete Auflage. 2013.	<i>Preisgruppe 1</i>
ÖWAV-Regelblatt 14	Sicherheit auf Abwasserreinigungsanlagen (Kläranlagen) – Errichtung – Anforderungen an Bau und Ausrüstung. 3., vollständig überarbeitete Auflage. 2010.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Regelblatt 15	Der Klärfacharbeiter – Berufsbild, Ausbildungsplan und Prüfungsordnung. 3., vollständig überarbeitete Auflage. 2013.	<i>Preisgruppe 1</i>
ÖWAV-Regelblatt 16	Einleitung von Abwasser aus der Betankung, Reparatur und Reinigung von Fahrzeugen in öffentliche Abwasseranlagen oder in Gewässer. 4., vollständig überarbeitete Auflage. 2010.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 17	Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2004 (Printversion vergriffen, nur mehr digital erhältlich).	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 18	Sicherheit auf Abwasserreinigungsanlagen (Kläranlagen) – Betrieb. 3., vollständig überarbeitete Auflage. 2014.	<i>Preisgruppe 1</i>
ÖWAV-Regelblatt 19	Richtlinien für die Bemessung von Mischwasserentlastungen. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2007.	<i>Preisgruppe 3</i>

ÖWWV-Regelblatt 20	Musterbetriebsordnung für Abwasserreinigungsanlagen. 1988.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 21	Kanalkataster. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 1998.	<i>ersetzt durch ÖWAV-RB 40</i>
ÖWAV-Regelblatt 22	Betrieb von Kanalisationsanlagen. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2015.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Regelblatt 23	Geruchsemissionen aus Abwasseranlagen. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2015.	<i>Preisgruppe 1</i>
ÖWAV-Regelblatt 24	EDV-Einsatz auf Abwasseranlagen. Prozessleittechnik – Prozessdatenverarbeitung. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2008.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Regelblatt 25	Abwasserentsorgung in dünn besiedelten Gebieten. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2010.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Regelblatt 26	Hinweise für das Einleiten von Abwässern aus Weinbau- und Kellereibetrieben in eine Abwasseranlage. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2006.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 27	Möglichkeiten der Entsorgung von Senkgrubenhaltungen und Schlämmen aus Kleinkläranlagen. 1992.	<i>vergriffen</i>
ÖWAV-Regelblatt 28	Unterirdische Kanalsanierung. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2007.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 29	Entsorgung von Räumgut aus kommunalen Abwasseranlagen. 1994.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Regelblatt 30	Sicherheitsrichtlinien für den Bau und Betrieb von Faulgasbehältern auf Abwasserreinigungsanlagen. 3., vollständig überarbeitete Auflage. 2007.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 31	Deponiesickerwasser. Reaktordeponie. 2000.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 32	Sicherheit auf Abwasserableitungsanlagen (Kanalisationsanlagen), Teil A: Errichtung – Anforderungen an Bau und Ausrüstung, Teil B: Betrieb. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2016.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 33	Überwachung wasserrechtlich nicht bewilligungspflichtiger Indirekteinleiter. 2002.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Regelblatt 34	Hochdruckreinigung von Kanälen. 2003 (Printversion vergriffen, nur mehr digital erhältlich).	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 35	Einleitung von Niederschlagswasser in Oberflächengewässer. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2019.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 36	Dienstanweisung für das Betriebspersonal von Abwasserbehandlungsanlagen. Inkl. CD-ROM. 2003.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 37	Umgang mit Löschwasser. 2019.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Regelblatt 38	Überprüfung stationärer Durchflussmeseinrichtungen auf Abwasserreinigungsanlagen. 2007.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 39	Einleitung von fetthaltigen Betriebsabwässern aus Gastronomie, Küchen und Lebensmittelverarbeitung in öffentliche Abwasseranlagen. 2008 (Printversion vergriffen, nur mehr digital erhältlich).	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Regelblatt 40	Leitungsinformationssystem – Wasser und Abwasser (gemeinsam mit ÖVGW, = ÖVGW-Richtlinie W 104). 2010 (Printversion vergriffen, nur mehr digital erhältlich).	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWAV-Regelblatt 42	Unterirdische Kanalsanierung – Hauskanäle. 2011.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 43	Optische Kanalinspektion. 2013.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 44	Der Kanalfacharbeiter – Berufsbild, Ausbildungsplan und Prüfungsordnung. 2012.	<i>Preisgruppe 1</i>
ÖWAV-Regelblatt 45	Oberflächenentwässerung durch Versickerung in den Untergrund. 2015.	<i>Preisgruppe 2</i>

Wasserhaushalt und Wasserversorgung

ÖWAV-Regelblatt 201	Praktische Anleitung für die Nutzung und den Schutz von Karstwasservorkommen. 2., überarbeitete Auflage. 2007.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWWV-Regelblatt 202	Tiefengrundwässer und Trinkwasserversorgung. 1986.	<i>zurückgezogen</i>

ÖWWV-Regelblatt 203	Trinkwassernotversorgung. 1989 (ersetzt durch ÖVGW-Regelblatt W 74, 2006).	<i>zurückgezogen</i>
ÖWWV-Regelblatt 204	Richtlinien für die Wasserversorgung im alpinen Bereich. 1990.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 205	Nutzung und Schutz von Quellen in nicht verkarsteten Bereichen. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2017.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWAV-Regelblatt 206	Klein- und Einzeltrinkwasserversorgungsanlagen (gemeinsam mit ÖVGW). 1993.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 207	Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2009.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 208	Bohrungen zur Grundwassererkundung. 1993.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 209	Entscheidungshilfen für Planung, Anlage, Bau und Betrieb von Golfplätzen aus wasserwirtschaftlicher Sicht. 1993.	<i>vergriffen</i>
ÖWAV-Regelblatt 210	Beschneigungsanlagen. 2., überarbeitete Auflage. 2007.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 211	Nutzung artesischer und gespannter Grundwässer. 2000.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 212	Skipisten. 1999.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWAV-Regelblatt 213	Tiefbohrungen zur Wassergewinnung. 2002.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWAV-Regelblatt 214	Markierungsversuche in der Hydrologie und Hydrogeologie. 2007.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWAV-Regelblatt 215	Nutzung und Schutz von Thermalwasservorkommen. 2010.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWAV-Regelblatt 216	Die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) von Golfplätzen aus wasserwirtschaftlicher Sicht. 2009.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 217	Schutz des Grundwassers beim Abbau von Sand und Kies. 2014.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 218	Brunnen in gespannten Grundwässern – Neuerrichtung, Sanierung und Rückbau. 2015.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Regelblatt 219	Tiefengrundwasserbewirtschaftung zum Zweck der Trinkwasserversorgung. 2018.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 220	Niederschlag-Abfluss-Modellierung. 2019.	<i>Gratisdownload</i>

Wasserbau, Ingenieurbilogie und Ökologie

ÖWWV-Regelblatt 301	Leitfaden für den natur- und landschaftsbezogenen Schutzwasserbau an Fließgewässern. 2. Auflage 1985.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 302	Expertenliste Biologie des ÖWAV. 2., überarbeitete Auflage 1999.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 303	Gewässerwärter/in – Gewässermeister/in. Berufsbild, Ausbildungsplan und Prüfungsordnung. 2017.	<i>Gratisdownload</i>

Qualität und Hygiene

ÖWAV-Regelblatt 401	Grundwasseruntersuchungen zur Beurteilung von altlastenverdächtigen Ablagerungen. 1992.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 402	Einfache Analysenverfahren auf Abfallbehandlungsanlagen. Teil 2: Eingangs-, Verfahrens- und Endproduktkontrolle auf Kompostierungsanlagen. 1999.	<i>Preisgruppe 1</i>
ÖWAV-Regelblatt 403	Nutzwasserverwendung. Mitteilung über die Verwendung von Nutzwasser in Gebäuden, ausgenommen Industrielle Anwendungen. 1998 (ersetzt durch ÖVGW-Mitteilung W 86, 2005).	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 404	Sicherheit, Gesundheitsschutz und Arbeitshygiene für Beschäftigte in der Abfallwirtschaft. 2001.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 405	Arbeitshygienische und arbeitsmedizinische Richtlinien für Abwasseranlagen. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2016.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 406	Begriffe der Membrantechnologie. 2002.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 407	Empfehlungen für die Bewässerung. Überarbeitete Neuauflage des ÖWAV-Arbeitshefts Nr. 11 (2003). 2016.	<i>Preisgruppe 2</i>

Abfallwirtschaft und Altlastensanierung

ÖWAV-Regelblatt 501	Ermittlung des Kapazitätsbedarfs für Kompostanlagen zur Verarbeitung getrennt erfaßter biogener Abfälle. 1996.	<i>vergriffen</i>
ÖWAV-Regelblatt 502	Entgasung von Deponiekörpern. 1997.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Regelblatt 503	Allgemeine Ausführungsrichtlinien für stationäre Problemstoffsammelstellen. 1997.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 504	Deponieeingangskontrolle. Anforderungsprofil für Leiter der Eingangskontrolle und Kontrollpersonal, Ausbildungsplan. 1997.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 505	Einfache Analysenverfahren auf Abfallbehandlungsanlagen. Teil 1: Eingangskontrolle auf Deponien. 1997.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 506	Das Fachpersonal für Problemstoffsammelstellen. Anforderungsprofil und Ausbildungsplan. 1997.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 507	Fachkraft Abfallwirtschaft. Anforderungen an die Ausbildung des Betriebspersonals von Abfallbehandlungsanlagen. 1998.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 508	Musterbetriebsprotokoll für Bioabfallkompostierungsanlagen. 1998.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 509	Abfallminimierung. Begriffe – Evaluierung – Berechnungsbeispiele. 2000.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 510	Problemstoff-Ausbildungslehrgänge. Ausbildung zum Befugten für die Problemstoffsammlung bzw. zum Abfallrechtlichen Geschäftsführer für kommunale Problemstoffsammlung. 1999.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Regelblatt 511	Durchführung der Eingangskontrolle auf Deponien. 3., überarbeitete Auflage. 2015.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 512	Abfallrechtlicher Geschäftsführer gemäß § 26 AWG 2002. Anforderungen und Ausbildungsinhalte für abfallrechtliche Geschäftsführer und Erlaubniswerber. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2008.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 513	Betrieb von Biofiltern. 2002.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 514	Die Anwendung der Stoffflussanalyse in der Abfallwirtschaft. 2003.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Regelblatt 515	Anaerobe Abfallbehandlung. Anforderungen an den Betrieb von Biogasanlagen. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2013.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWAV-Regelblatt 516	Ausbildungskurs für das Betriebspersonal von Biogasanlagen. Anforderungen und Ausbildungsinhalte. 2006.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 517	Anforderungen an die Ausstattung und den Betrieb von Abfallzwischenlagern erlaubnispflichtiger Abfallsammler gemäß § 24a AWG 2002. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2019.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWAV-Regelblatt 518	Anforderungen an den Betrieb von Kompostierungsanlagen. 2009 (Printversion vergriffen, nur mehr digital erhältlich).	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 519	Energetische Wirkungsgrade von Abfallverbrennungsanlagen. 2., überarbeitete Auflage. 2013.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Regelblatt 520	Durchführung der Eingangskontrolle auf Bodenaushubdeponien. Auszug aus ÖWAV-Regelblatt 511 (3. Auflage, 2015). 2., überarbeitete Auflage. 2015.	<i>Preisgruppe 2</i>

B) ÖWAV-Arbeitsbehelfe

Abwassertechnik und Gewässerschutz

ÖWWV-Arbeitsbehelf Nr. 1	Die Ausbildung von Klärwärtern auf Lehrkläranlagen. 1981.	<i>vergriffen</i>
ÖWWV-Arbeitsbehelf Nr. 8	Kläranlagennachbarschaften in Österreich – Ein Beitrag zur Reinhaltung der Gewässer. 1991.	<i>vergriffen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 9	Kennzahlen für Abwasserreinigungsanlagen. Teil 1: Ablaufqualität – Bewertung und Beurteilung. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2000.	<i>Preisgruppe 1</i>

ÖWAV-Arbeitsbehelf 14	Eigen- und Betriebsüberwachung von biologischen Abwasserreinigungsanlagen (> 50 EW). 3., vollständig überarbeitete Auflage. 2010.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 22	Kläranlagenzustandsbericht. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2015.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 24	Evaluierung von Arbeitsplätzen in Abwasseranlagen und deren Dokumentation. 2000.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 25	Indirekteinleiterkataster. 1999.	<i>Preisgruppe 1</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 27	Praktikum auf Lehrkanalanlagen (Ausbildungskanalbetrieben). 2000.	<i>Preisgruppe 1</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 29	Öffentlichkeitsarbeit auf Kläranlagen (inkl. Arbeitsmaterialien für Pflichtschulen). 2004.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 31	Membrantechnologie – Verfahren zur Abwasserbehandlung. 2003.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 34	Leitfaden für die Ausschreibung der Hochdruckreinigung von Kanälen. 2005. (Printversion vergriffen, nur mehr digital erhältlich).	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 36	Praxishilfe zum Erstellen des Explosionsschutzdokuments (ExSD) für abwassertechnische Anlagen (Kanal- und Kläranlagen). 2006.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 37	Überprüfung des Betriebszustandes von Abwasserreinigungsanlagen (> 50 EW) Teil A: Fremdüberprüfung. Teil B: Eigenüberprüfungen. 2010.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 45	Musterstellenbeschreibungen für das Personal von Kanalisations- und Abwasserreinigungsanlagen. 2014. (Printversion vergriffen, nur mehr digital erhältlich).	<i>Preisgruppe 1</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 50	Kanalsanierung – Vor Ort härtendes Schlauchlining. 2017. (Printversion vergriffen, nur mehr digital erhältlich).	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 54	Kanalsanierung – Langrohr-Lining, Kurzrohr-Lining, Verformte Rohre. 2019.	<i>Preisgruppe 2</i>

Wasserhaushalt und Wasservorsorge

ÖWWV-Arbeitsbehelf Nr. 2	Grundwasser-Schongebiete. 1984.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWWV-Arbeitsbehelf Nr. 3	Wasserwirtschaftliche Gesichtspunkte für die Projektierung von Grundwasserwärmepumpenanlagen (GWPA). 1986.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 19	Leitfaden für die Bearbeitung von Grundwassersanierungsgebieten. 1996.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 43	Leitfaden zur Anwendung der Thermalfahnenformel des ÖWAV-Regelblatts 207. 2014.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 47	Bodenfunktionen für die Wasserwirtschaft. 2016.	<i>Preisgruppe 3</i>

Wasserbau, Ingenieurbioogie und Ökologie

ÖWWV-Arbeitsbehelf Nr. 4	Grundsätze der Gewässerinstandhaltung. 1987.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 42	Mobiler Hochwasserschutz. 2013.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 46	Praktische Umsetzung und Beispiele des Fischeaufstiegshilfen-Leitfadens. Teil 1: Vorschläge für zulässige Bautoleranzen bzw. zulässige Variation der technischen Parameter bei errichteten FAHs. 2016.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 49	Neophytenmanagement. Behandlung invasiver gebietsfremder Pflanzenarten. 2016.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 53	Zustandsermittlung von Hochwasserschutzdämmen als Grundlage für die Sanierung. 2017.	<i>Preisgruppe 4</i>

Qualität und Hygiene

ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 11	Empfehlungen für Bewässerungswasser. 2., überarbeitete Auflage. 2003. [ersetzt durch ÖWAV-Regelblatt 407]	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 30	Informationen zum Membranbelebungsverfahren. 2002.	<i>Preisgruppe 4</i>

ÖWAV-Arbeitsbehelf 32	Anwendung von Membranverfahren in der Reinwassertechnologie. 2005.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 38	Bestimmung der Oberflächenspannung in gereinigten Abwässern. 2., überarbeitete Auflage. 2016.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 39	Korrosion im Wasser- und Abwasserfach. 2010.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 52	Mikrobiologie und Wasser. Teil 1: Übersicht zu den methodischen Möglichkeiten der Analyse. 2017.	<i>Preisgruppe 3</i>

Recht und Wirtschaft

ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 5	Mustersatzungen für Hochwasserschutzverbände. 3., überarbeitete Auflage. 2003.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWWV-Arbeitsbehelf Nr. 6	Grundlagen und Organisation des Rechnungswesens von Abwasserverbänden. 1988.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWWV-Arbeitsbehelf Nr. 7	Grundsätze für die Versicherung von Abwasserentsorgungsanlagen. 1988.	<i>vergriffen</i>
	Ergänzungsblatt: Grundsätze für Versicherungsfragen in der Siedlungswasserwirtschaft. 1991.	<i>vergriffen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 10	Interkommunale Zusammenarbeit – Betriebs- und Betreuungsgemeinschaften in der Abwasserentsorgung. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2011.	<i>Preisgruppe 1</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 12	Grundlagen und Organisation des Rechnungswesens von Wasserversorgungs- und Abfallverbänden. Ergänzungsband zum Arbeitsbehelf Nr. 6. 1993.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 13	Mustersatzungen für Wasserversorgungs- und Abwasser-/Reinhalungsverbände. 3., überarbeitete Auflage. 2016.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 15	Mustersatzungen für Abfallwirtschaftsverbände. 1996.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 16	Grundsätze der Gebührenkalkulation in der Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft. 1996.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 18	Musterbetriebskostenrechnung am Beispiel der Abwasserentsorgung. 1996.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 20	Anwendung des UVP-Gesetzes. 1996.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 21	Abfallgebührenkalkulation und Abfallgebührenmodelle. Ein Arbeitsbehelf für Gemeinden. 1997.	<i>vergriffen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 23	Geschäftsbedingungen für die Indirekteinleitung in öffentliche Kanalisationsanlagen. 2., überarbeitete Auflage. 2002.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 28	Grundlagen und Organisation des Rechnungswesens von Ver- und Entsorgungsverbänden. 2000.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 33	Leitfaden für die Auftragsvergabe in der Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2015.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 35	Aktuelle Finanzierungs- und Veranlagungsmöglichkeiten für die Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft. 2., vollständig überarbeitete Auflage. 2011.	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 40	Grundlagen und Aufbau des Rechnungswesens in der Abwasserentsorgung. Buchführung und Jahresabschluss. 2010. (Printversion vergriffen, nur mehr digital erhältlich).	<i>Preisgruppe 4</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 41	Grundlagen und Aufbau der Kosten- und Leistungsrechnung in der Abwasserentsorgung. 2013.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 48	Grundlagen und Aufbau einer Gebührenkalkulation in der Abwasserentsorgung. 2016.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 59	Mustergeschäftsordnung für Wasser- und Abwasser-/Reinhalungsverbände. 2019.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 61	VRV in der Abwasser-, Abfall- und Schutzwasserwirtschaft. 2018.	<i>Preisgruppe 4</i>

Abfallwirtschaft und Altlastensanierung

ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 17	Logistik in der Abfallwirtschaft. 1996.	<i>zurückgezogen</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 44	Herstellung von Komposterden (Mischungen aus Kompost und Bodenaushubmaterial. 2014.	<i>Preisgruppe 1</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 57	Sammlung und Verwertung von Metallspänen, -schlämmen und -stäuben aus der mechanischen Bearbeitung. 2018.	<i>Preisgruppe 2</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 58	Verwertung von unbehandeltem Altholz – Abfall, Abfallende, Nebenprodukt. 2019.	<i>Preisgruppe 3</i>
ÖWAV-Arbeitsbehelf 60	Leitfaden zur Altholzsortierung. 2018.	<i>Gratisdownload</i>

Umweltschutz allgemein

ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 26	Anwendung EDV-gestützter Modellrechnung im Umweltschutz. 2000.	<i>zurückgezogen</i>
---------------------------	--	----------------------

WEITERE ÖWAV-PUBLIKATIONEN

Informationsreihe Betriebspersonal Abwasseranlagen

Folge 1 (1992/93) bis Folge 24 (2016)		<i>vergriffen</i>
Folge 25	Kanal- und Kläranlagen-Nachbarschaften 2017. 2017.	<i>Preisgruppe 5</i>
Folge 26	Kanal- und Kläranlagen-Nachbarschaften 2018. 2018.	<i>Preisgruppe 5</i>

ÖWAV-Merkblätter

ÖWAV-Merkblatt	Hygiene-Merkblatt für das Betriebspersonal von Abwasseranlagen. 2017.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Merkblatt	Mindestanforderung für die Sicherheitsausrüstung im Kanalbetrieb. 2016.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Merkblatt	ÖPUL – Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung. Merkblatt für Landwirte und Kläranlagenbetreiber. 2000.	<i>vergriffen</i>
ÖWAV-Merkblatt	Personalbedarf für den Betrieb kommunaler biologischer Kläranlagen. 2017.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Merkblatt	Private Hallen- und Freischwimmbäder – Ableitung von Spül-, Reinigungs- und Beckenwasser. 2011.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Merkblatt	Rufbereitschaftsdienste für kommunale Abwasseranlagen (Kanalisations- und Kläranlagen). 2011.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Merkblatt	Schadstoffausbreitung im Kanalnetz – Kooperation mit Einsatzkräften. 2015.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Merkblatt	Zivil- und strafrechtliche Haftung und Verantwortung in Wasser-, Abwasser- und Abfallverbänden. 2006.	<i>Gratisdownload</i>

ÖWAV-Umweltmerkblätter

(zuvor als ÖWAV-WIFI-Umweltmerkblätter erschienen)

ÖWAV-Umweltmerkblatt für Autobus-, Taxi- und Mietwagenunternehmen. 2004.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für Autoverwertungsbetriebe. 2004.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für Betreiber von Campingplätzen. 2005.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für Frächter. 2004.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für Gastronomie- und Beherbergungsbetriebe. 2009.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für Holz bearbeitende Betriebe. 2005.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für Kfz-Freiwashplätze und Waschanlagen. 2004.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für Kfz-Werkstätten. 2004.	<i>Gratisdownload</i>

ÖWAV-Umweltmerkblatt für kleine Molkereien und Käsereien. 2004.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für kleine Schlachtbetriebe und Fleischer. 2005.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für die Lagerung von Chemikalien in Betrieben. 2004.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für Lkw-Waschplätze. 2004.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für Malerbetriebe. 2017.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für Metall verarbeitende Betriebe. 2011.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für Sägewerke. 2005.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für Tankstellen. 2004.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für temporär betriebene Nassholzlager. 2016.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt Umweltschutz im Bürobetrieb. 2010.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt für Weinbau und Weinkellereien. 2004.	<i>Gratisdownload</i>
ÖWAV-Umweltmerkblatt Wasserwirtschaft und Gewässerschutz auf Baustellen. 2008.	<i>Gratisdownload</i>

Übersicht über die Preisgruppen

Die angegebenen Preise verstehen sich netto zuzügl. USt. (+ Versand, nur bei Printpublikationen)
(Die Preisliste ist **gültig bis 31. Dezember 2019**. Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten.)

Preisgruppen	Preis Download ÖWAV-Mitglied	Preis Download Nichtmitglied	Preis Print ÖWAV-Mitglied	Preis Print Nichtmitglied
Preisgruppe 1	15,00 Euro	25,00 Euro	20,00 Euro	30,00 Euro
Preisgruppe 2	20,00 Euro	30,00 Euro	25,00 Euro	35,00 Euro
Preisgruppe 3	25,00 Euro	35,00 Euro	30,00 Euro	40,00 Euro
Preisgruppe 4	30,00 Euro	40,00 Euro	35,00 Euro	45,00 Euro
Preisgruppe 5			50,00 Euro	60,00 Euro

Bezugsmöglichkeiten

Die genannten Publikationen sind erhältlich bei:

Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), Marc-Aurel-Straße 5, 1010 Wien,
Tel. 01/535 57 20, www.oewav.at/publikationen

Austrian Standards plus GmbH, 1020 Wien, Heinestraße 38, Tel. 01/21300-444, sales@as-plus.at,
www.austrian-standards.at



zukunft
SEIT 1909
denken

Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband

Gegründet 1909

1010 Wien, Marc-Aurel-Straße 5

Tel. +43-1-535 57 20, Fax +43-1-535 40 64, buero@oewav.at, www.oewav.at

Das österreichische **Kompetenz-Zentrum**
für **Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft.**

Veranstaltungen

- Österreichische Abfallwirtschaftstagung
- Österreichische Wasserwirtschaftstagung
- Österreichische Umweltrechtstage
- Seminare und Fortbildungskurse zu aktuellen Themen der Wasser- und Abfallwirtschaft
- Erfahrungsaustausch für Betreiber von Abwasser-, Abfallbehandlungs- und Hochwasserschutzanlagen
- Kurse für das Betriebspersonal von Abwasseranlagen, Praktikum auf Lehrklär- und Lehrkanalanlagen, Kanal- und Kläranlagen-Nachbarschaften
- Kurse für das Betriebspersonal von Abfallbehandlungsanlagen
- Kurse in den Bereichen Gewässerpflege, kleine Stau- und Sperrenanlagen, Hochwasserschutz- und Beschneigungsanlagen
- Gemeinsame Veranstaltungen mit in- und ausländischen Fachorganisationen
- Exkursionen

Fachgruppen und Arbeitsausschüsse

- Ausarbeitung von Regelblättern, Arbeitsbehelfen, Merkblättern und Leitfäden
- Erarbeitung von Positions- und Ausschusspapieren sowie Stellungnahmen zu Gesetzesvorhaben

Beratung und Information

- Auskünfte und individuelle Beratung
- Wasser- und abfallwirtschaftliche Informationsschriften und Beiträge, Öffentlichkeitsarbeit

Veröffentlichungen

- Fachzeitschrift „Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft“ (ÖWAW)
- ÖWAV-Homepage (www.oewav.at)
- ÖWAV-News (HTML-Newsletter)
- Tätigkeitsbericht des ÖWAV
- Schriftenreihe des ÖWAV (Wasser- und Abfallrechtliche Judikatur in Leitsatzform)
- Veröffentlichungen zu Tagungen und Seminaren des ÖWAV
- Regelblätter*), Arbeitsbehelfe*) und Merkblätter des ÖWAV, Positions- und Ausschusspapiere
- Informationsreihe Betriebspersonal Abwasseranlagen*)
- ÖWAV-WKO-Umweltmerkblätter für Gewerbebetriebe
- KA-Betriebsinfo¹⁾
- Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer¹⁾

Verbindungsstelle (Nationalkomitee) der

- European Water Association – EWA

Mitglied der österreichischen Vertretung zur

- European Union of National Associations of Water Suppliers and Waste Water Services – EUREAU (gem. mit ÖVGW)
- International Solid Waste Association – ISWA
- International Water Association – IWA (gem. mit ÖVGW)

*) in Kommission bei Austrian Standards plus GmbH, Wien

¹⁾ Mitherausgeber

