

Natalie Stahl und Markus Casper

Eine neue ereignisbasierte Variante zur Ableitung von synthetischen Niederschlagsverteilungen zur Generierung von Hochwasserganglinien mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell LARSIM am Beispiel des Isareinzugsgebietes

A new method of deriving synthetic rainfall sequences for generating hydrographs using the Rainfall-Runoff-Modell LARSIM with the example of the Isar catchment

Abstract

Für die Wirkungsanalyse von gekoppelten Hochwasserrückhalteräumen in komplexen Einzugsgebieten müssen Ganglinien generiert werden, die den Wellenablauf des Hochwassers im gesamten Einzugsgebiet repräsentieren. Geht man von nicht beobachteten oder durch Steuerung beeinflussten Einzugsgebieten aus (unterhalb bereits vorhandener Rückhalteräume), ist ein Niederschlag-Abfluss-Modell - wie in der vorliegenden Analyse - notwendig, um diese Ganglinien zu erzeugen. Der Artikel beschäftigt sich mit der Frage, wie sich der Einsatz verschiedener in der Praxis angewandter Verfahren zur Generierung von Ganglinien auf die Ergebnisse auswirkt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Analyse des Niederschlagsverlaufes. Es wird ein neues Verfahren zur Ableitung von Ganglinien aus standardisierten beobachteten Niederschlagsverläufen entwickelt und in der Leistungsfähigkeit zur Ableitung repräsentativer Ganglinien im Vergleich zu den bisher in der Bemessung eingesetzten synthetischen Niederschlagsverläufen diskutiert. Dafür ist eine Voranalyse der Hochwassergenese und der Hochwasserganglinien wichtig, die am Beispiel des Sylvensteinspeichers im alpinen Isareinzugsgebiet anhand der drei größten beobachteten Ereignisse durchgeführt wird. Die mit der neuen Methode generierten Ganglinien werden mit diesen Hochwasserganglinien verglichen und für das gesamte Isareinzugsgebiet bezüglich der Wellenüberlagerung diskutiert.

Es kann gezeigt werden, dass die mit der neuen Methode standardisierten beobachteten Niederschlagsverläufe besser geeignet sind, die Wellenüberlagerung im Einzugsgebiet wiederzugeben, da zeitliche Unterschiede durch die Stauwirkungen an den Alpen berücksichtigt werden, wie sie bei Zugbahn geprägten Wetterlagen entstehen. Es kann daher bei ähnlichen Fragestellungen für alpine und voralpine Einzugsgebiete empfohlen werden, die neue Methode in der Praxis als Variante hinzuzuziehen, um die natürlichen Prozesse repräsentativer zu beschreiben. Die Unsicherheiten in der Berechnung konnten durch Variantenrechnung der Abflussbeiwerte gezeigt werden. In den Berechnungen hat sich herausgestellt, dass nicht nur der Niederschlagsverlauf und die Vorbedingungen des Ereignisses wie erwartet eine große Auswirkung auf die Kalibrierung der Abflussbeiwerte im N-A-Modell haben, sondern auch das gewählte Flood-Routing-Verfahren und die Gerinne Rauheit.

Schlagwörter: Synthetische Niederschlagsverläufe, Gangliniensimulation, Niederschlag-Abfluss-Modell LARSIM, Wirkungsanalyse von gekoppelten Hochwasserrückhalteräumen, Hochwassergenese

Abstract

For impact assessment of interacting flood reservoirs in complex catchments it is required to generate hydrographs, which represent the peak processing of the flood in the entire catchment. Concerning unobserved or regulated (downriver of existing reservoirs) catchments a rainfall-runoff model – as presented in this analysis - is essential, to create these hydrographs. This paper concentrates on the question, how different recommended practices for generating hydrographs manipulate the results focusing on the precipitation sequence. A new method is developed to generate hydrographs using standardized observed rainfall sequences and method performance is discussed in comparison to common practice using synthetic precipitation sequences. Pre-analysis of flood generation and hydrographs are necessary, as realized for the example of the Sylvenstein reservoir in the alpine catchment of the river Isar on the basis of the three observed severest flood events. The observed hydrographs are compared with the hydrographs generated by the new method and those are discussed concerning peak overlap for the entire catchment.

It can be demonstrated, that the new method using standardized observed rainfall sequences is more adapted to reproduce the peak overlap in the catchment, in case of weather situations with tracking rainfall, because choked flow at the alpine mountains is considered. For similar cases it can be recommended to include the new method as a variant, in order to represent the natural process more adequate. The uncertainties of the calculation can be shown via ensembles with different runoff coefficients. During calculation it turned out, that not only rainfall sequence and preconditions are highly relevant for calibration of the rainfall-runoff model runoff coefficient (how expected) but although the method of flood routing and the roughness coefficients.

Keywords: Synthetic precipitation sequences, hydrograph simulation, rainfall-runoff-model LARSIM, impact assessment of interacting flood reservoirs, flood generation

Einleitung

Für die Resilienz gegen Hochwasser sind Vorsorge- und Schutzmaßnahmen wichtig (WEISS, 2013). Nach den großen Hochwassern der letzten Dekade richtet sich bei der Planung und beim Management von Rückhaltebecken immer mehr der Fokus auf das Gesamtsystem und damit über den lokalen Schutz hinaus, wie für Bayern im Aktionsprogramm 2020 Plus gefordert (STMUV, 2014). Dies stellt erhöhte Anforderungen an die Wirkungsweise von Hochwasserschutzmaßnahmen, die nicht nur einzeln optimal wirken sollen, sondern auch im Verbund. Betrachtet man komplexe größere Flusssysteme, ist auch die Wellenüberlagerung der Teileinzugsgebiete zu berücksichtigen, um die regionale und überregionale Schutzwirkung zu beurteilen. Regional wird dabei definiert als nach dem Zusammenfluss mit einem für den Verlauf des Hochwassers wichtigen Nebengewässer und überregional nach dem Zufluss in ein Hauptgewässer (STAHL et al., 2016). Für die Bemessung von gekoppelten Rückhalteräumen oder die Beurteilung ihrer regionalen oder überregionalen Wirkung zur Hochwasser-scheitelreduktion müssen daher Ganglinien für den Zufluss zu den Rückhalteräumen und die Abflussganglinien der Einzugsgebiete unterhalb betrachtet werden (SEIBERT et al., 2014). Für die Wirkung der Rückhalteräume ist neben den Scheiteln auch das Volumen der Wellen von Bedeutung, um den Bedarf an Rückhaltevolumen ins Verhältnis zur Scheitelreduktion zu setzen (HUBER, 2007). Diese Anforderungen stellen die Praxis bei der Planung und Optimierung insbesondere von gekoppelten Rückhaltesystemen vor das Problem, wie diese Ganglinien erzeugt werden können. Für die Ableitung dieser Ganglinien braucht man für unbeobachtete Einzugsgebiete Niederschlags-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle) (BLÖSCHL, 2005), die durch synthetische Niederschlagsverteilungen angetrieben werden. Dieses Vorgehen ist aber auch notwendig für Einzugsgebiete, deren Pegelaufzeichnungen nicht mehr die Voraussetzung der Statistik erfüllen, weil sie unterhalb bereits vorhandener Speicher liegen, die über das gesamte Jahr die Abflüsse verändern, wie an der Isar und am Lech (HOLLE et al., 2014).

1. Stand der Forschung versus Praxis: Berechnung von Hochwasserganglinien mittels N-A-Modellen mit Fokus auf alpine und voralpine Einzugsgebiete

1.1. Hydrologische Ansätze und Abflussbildung

Die hydrologische Modellierung unbeobachteter Einzugsgebiete ist schwierig und die bisherigen Ansätze sind nicht ausreichend. Deshalb hat sich 2003 eine Initiative für die Vorhersage in unbeobachteten Einzugsgebieten (PUB) der Internationalen Assoziation der hydrologischen Wissenschaften (IAHS) gebildet (HRACHOWITZ et al., 2013). Diese widmet sich der Weiterentwicklung der hydrologischen Modelle durch Verbesserung des Prozesswissens um die Abflussbildung und ausdrücklich nicht einer erneuten Parametersuche für die Schätzverfahren zum Abflussbeiwert, wie sie derzeit in der Praxis üblich sind. Da die Methoden zwischen Wissenschaft und Praxis zunehmend auseinanderdriften, ist die Verbesserung des Wissenstransfers von der Wissenschaft in die Praxis ein weiteres Ziel der Initiative. Als Hindernisgründe für die Umsetzung in die Praxis werden nach wie vor die starke Fokussierung auf wissenschaftliche Aspekte und die daraus resultierenden komplexen Methoden gesehen. Auch in den alpinen und voralpinen Bereichen in Bayern (LFU,

2012) und in Österreich (KOHL, 2009; MERZ et al., 2002) finden die schon älteren aber für die Bemessung etablierten einfach anzuwendenden Methoden auf Basis von N-A-Modellen Anwendung (DVWK, 1984; DVWK, 1999b). Bei der Berechnung der Abflüsse aus dem Niederschlag liegt eine große Unsicherheit in der Parametrisierung der Abflussbildung, insbesondere in der Schätzung des Abflussbeiwertes PSI. Bemühungen, diese etablierten Ansätze für die Praxis weiterzuentwickeln, zielen meist darauf ab, die Ansätze für die Parameterschätzung zu verbessern. Die Ansätze für die Schätzung von PSI aus den Gebieteigenschaften sind ebenfalls relativ alt und nicht anhand alpiner Einzugsgebiete abgeleitet worden, z. B. die Methode nach Lutz (1984) und die SCS-Methode (US-SCS, 1972). Für Österreich konnte gezeigt werden, dass die CN-Werte nicht geeignet sind, die Hochwasserentstehung in Österreich abzubilden (MERZ, 2009). MERZ empfiehlt die Ermittlung aus gemessenen Abflüssen und eine Übertragung auf unbeobachtete Gebiete. Für Bayern wurde zur Verbesserung der Verfahren ebenfalls eine umfangreiche Regionalisierung von Hochwasserabflüssen anhand gemessener Daten durchgeführt - auch für den alpinen und voralpinen Raum -, wobei auch eine systematische Untersuchung der Abflussbeiwerte durchgeführt wurde (OTT, 1997). Die Auflösung dieser Daten erfüllt jedoch nicht mehr die Ansprüche flächendetaillierter Modellierungen. Für die Wildbäche in Bayern wurde daher im Projekt EGAR eine aufwendige Kartierung durchgeführt, um aus den Standorteigenschaften flächendetaillierte CN-Werte abzuleiten (LFU, 2014). Für die Entwicklung der Methodik wurde nicht nur kartiert, sondern an den Wildbächen in Bayern und Österreich wurden auch umfangreiche Berechnungsversuche durchgeführt und eine gemeinsame Datenbank aufgebaut (KIRNBAUER, 2009). Diese Daten ermöglichen die Abschätzung von Hochwasserabflüssen in unbeobachteten Wildbacheinzugsgebieten (KOHL et al., 2005). Die Vorgabe der EGAR-CN-Daten in Bayern hat zu wesentlichen Verbesserungen in der Vergleichbarkeit von Berechnungsergebnissen geführt. Die Daten können auf Grund leichter Fehlklassifikationen aber weiterhin große Unsicherheiten in der Abflussschätzung ergeben, da kleine Unterschiede in den Vegetationsklassen zu großen Unterschieden in der Abflussreaktion führen. Für die Wildbäche in Österreich wurde auch eine Kartieranleitung für die Abschätzung von Abflussbeiwerten im Gelände herausgegeben (MARKART et al., 2004). Auf Grund der Unsicherheiten in der Erfassung der Gebieteigenschaften, die trotz aller dieser Bemühungen weiter bestehen, sind die gegenwärtigen Module zur Beschreibung der Abflussbildung in konzeptionellen hydrologischen Modellen stark auf die Kalibrierungen durch Messungen angewiesen (BLÖSCHL, 2005). Hilfreich sind für die Kalibrierung der Abflussbeiwerte auch regionale Auswertungen von Hochwasser-Abflussereignissen, die Aussagen für unbeobachtete Gebiete ableiten lassen (BLÖSCHL, 2005). Werden größere Gebiete mit flächendetaillierten N-A-Modellen berechnet, kann dieser Vorteil der Kalibrierung auch direkt genutzt werden, da über unterhalb gelegene Pegel auch die Abflussbeiwerte der unbeobachteten Gebiete kalibriert werden können, sofern diese Gebiete abflussbildend am Pegel mitwirken. Systematische Untersuchungen abgelaufener Ereignisse und der aufgetretenen Abflussbeiwerte gibt es z. B. für Österreich (MERZ et al., 2006) und die Schweiz (NAEF, 1993). Diese Auswertungen ermöglichen es auch, ein Maß für die ereignisabhängige Variabilität der Abflussbeiwerte durch die unterschiedliche Abflussbereitschaft des Gebietes auf Grund der Vorbedingungen zu erhalten (MERZ et al., 2006). Der Abflussbeiwert kann viel stärker vom einzelnen Ereignis abhängig sein als von den Gebieteigenschaften (NAEFF,

1993). Diese Unsicherheit der Ergebnisse bei N-A-Modellen kann durch Variantenrechnungen mit unterschiedlichen Abflussbeiwerten abgebildet werden.

Der Arbeitsaufwand bei der Parametrisierung flächendetailierter N-A-Modelle liegt nicht in der Durchführung zahlreicher Simulationen zur Minimierung einer Zielfunktion, sondern in der detaillierten hydrologischen Interpretation. Vorwissen über die Eigenschaften hydrologischer Prozesse ist dafür Voraussetzung (RESZLER et al., 2006). Die Defizite in der richtigen Beschreibung der Gebieteigenschaften können durch Zusatzinformationen über die Abflussprozesse vermindert werden (CASPER et al., 2015). Daher konzentrieren sich einige wissenschaftlichen Weiterentwicklungen auf das Konzept der Abflussprozessstypen (SCHERRER, 1997; SCHERRER et al., 2003). Die Arbeitsgruppe der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Wasser und Abfall e. V. (DWA AG HW-1.3) „Bodenhydrologische Kartierung“ erarbeitet seit 2011 eine entsprechende Kartieranleitung, um am Standort Abflussprozesse zu erkennen und anzusprechen (KOHL et al., 2016): Für die alpinen und voralpinen Gebiete sind die daraus abzuleitenden Abflussprozesskarten noch nicht flächendeckend in der Praxis nutzbar, auch wenn in der Schweiz (ANTONETTI et al., 2016) und Österreich entsprechende Arbeiten vorangetrieben werden (KIRNBAUER, 2009). Um Zusatzwissen über die Abflussprozesse in den Einzugsgebieten zu erhalten, sind Analysen abgelaufener Hochwasser wichtig (MERZ, 2008).

Besondere Bedeutung erlangt die Bestimmung der Abflussbeiwerte für die Praxis, wenn Bemessungswerte errechnet werden müssen. Für die Bemessung und für die Sicherheit von Rückhaltebecken sind Nachweise für bestimmte statistische Kennzahlen gefordert (DIN 19700, 2004). In unbeobachteten Einzugsgebieten hängt der berechnete Bemessungswert - wie beschrieben - stark von dem geschätzten Abflussbeiwert aus den Gebieteigenschaften oder der Regionalisierung ab. In beobachteten Einzugsgebieten können die statistischen Kennzahlen aus der Pegelstatistik abgeleitet werden (DWA, 2012). Der Abflussbeiwert der N-A-Modellierung kann in beobachteten Gebieten an die statistischen Pegelwerte kalibriert werden, um eine Hochwasserganglinie einer bestimmten Jährlichkeit zu berechnen (MERZ 2009). Dies bezieht sich für Bayern auf die Scheitelwerte, da üblicherweise keine Volumenstatistiken vorliegen.

1.2 Hochwassergenese

Um das Expertenwissen über Hochwasser zu verbessern, werden Analysen von abgelaufenen großen Ereignissen durchgeführt. Für den Extremwertbereich liegen jedoch nur wenige Beobachtungsdaten vor, weshalb es schwierig ist, daraus allgemeingültige und übertragbare Aussagen abzuleiten. Trotzdem kommt der Analyse der Genese einzelner Ereignisse - auch historischer Ereignisse - Bedeutung zu, um die Hochwasserstatistiken zu verbessern (MERZ et al., 2008) und für künftige Hochwasser zu lernen. Diesem Thema widmeten sich auch mehrere Forschungsprojekte im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunkts RIMAX (MERZ, 2007). Der Vorteil der beobachteten Hochwasserganglinien ist, dass sie bereits die Hochwassergenese und den Hochwasserablauf in der Region repräsentieren, da die Niederschlagsverteilung über die Zeit, die räumliche Verteilung im Gebiet, die Konzentrationszeit, die Retention und die Wellenüberlagerung den Verlauf der Abflussganglinie bestimmen (GÖTZINGER, 2008). Der Nachteil ist, dass ohne eine genaue Prozessanalyse nicht gesagt werden kann, welcher Anteil der Welle einem typischen Verlauf entspricht, der auch für andere Hochwasser zu erwarten ist und welcher eine zufällige Ausprä-

gung des beobachteten Ereignisses ist. So geben beobachtete Niederschläge von einzelnen Hochwassern räumliche Muster, die deterministisch durch die naturräumlichen Gegebenheiten des Reliefs z. B. durch Hebungsprozesse als Stauniederschläge entstehen, wieder. Eingelagerte Starkniederschlagszellen, die auch innerhalb größerer Niederschlagsereignisse auftreten z. B. bei Vb-Zugbahnen, können jedoch darüber hinaus unabhängig von der Topographie kleinräumig und zufällig auftreten (SCHLÜTER et al., 2008). Um zwischen deterministischen und zufälligen Mustern zu unterscheiden, müssen verschiedene Ereignisse betrachtet und analysiert werden.

In diesem Zusammenhang steht auch die Erforschung der Hochwasser auslösenden Wetterlagen. Sie hat sich erst in den letzten Jahren einer systematischen Untersuchung verschrieben, um deterministische Zusammenhänge zwischen Wetterlagen und Hochwasser zu untersuchen (NISSEN et al., 2013; MUDELSEE et al., 2004; HOFSTÄTTER et al., 2012). Die Frage nach dem charakteristischen überregionalen Hochwasser auslösenden Niederschlagsereignis im Alpenraum kann über diese Analysen der hochwasserrelevanten Wetterlagen und Zugbahnen beantwortet werden. Vor allem das Tief über Mitteleuropa in Kombination mit Vb-Zugbahnen (VAN BEBBER, 1891) ist signifikant überproportional Ursache für Hochwasser (MESSMER et al., 2015). Für die regional und überregional wirksamen Hochwasserniederschläge sind die hohen Dauerstufen (Niederschlagsdauer) um 36 Stunden relevant. Für diese wurde im Projekt WETRAX über die Analyse der Starkniederschläge Mitteleuropas im Zeitraum 1961 bis 2002 gezeigt, dass die größten Niederschlagsereignisse durch die Wetterlage Tief über Mitteleuropa mit einer Vb-Zugbahn ausgelöst wurden. (HOFSTÄTTER et al., 2015). Das Tief über Mitteleuropa ist auch mit Vb ähnlicher Zugbahn Auslöser von Starkregen mit Hochwasser wie 2013 (ZIESE et al., 2016), 2005 (LfU, 2008) und 1999 (LfW, 2003), aber auch bei Persistenz des Zentrums nördlich der Alpen wie 2016 (ZIESE et al. 2016). Aus diesen neuen Ergebnissen der Wetterlagenforschung sind noch keine direkten Handlungsempfehlungen für die Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen abgeleitet worden, auch wenn das als Ziel des Projektes WETRAX formuliert wurde.

1.3 Niederschlagsverteilung

Neben dem hydrologischen Modell und seiner Parametrisierung ist der Eingangs-Niederschlag eine weitere steuernde Größe bei den N-A-Modellen. Für den Niederschlag verschiedener Dauerstufen liegen durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) statistische Analysen über die Niederschlagssummen vor. Die Statistik für die KOSTRA-2000 Daten des DWD für Dauerstufen größer 24 h setzt auf der Regionalisierung von Niederschlagszeitreihen im 1-km-Raster (REGNIE) für den Zeitraum 1951 bis 2000 auf (MALITZ, 2005). Die DVWK-Empfehlung (1991) lautet, dass keine Abminderung der statistischen Punktniederschläge für größere Einzugsgebiete vorgenommen werden muss, wenn die Wirkung von Speichern untersucht wird. Daher sind diese statistischen Niederschlagssummen auch für die Wirkungsanalyse größerer Einzugsgebiete verwendbar. Der Nachteil der statistisch ermittelten Niederschlagsmengen ist, dass sie als Summenwerte angegeben werden ohne Angabe über die zeitliche Verteilung innerhalb der jeweiligen Dauerstufe. Für das entstehende Hochwasser ist aber nicht nur die Summe, sondern vor allem auch die zeitliche Verteilung ausschlaggebend (MERZ, 2009). Dem wird in der Praxis Rechnung getragen, in dem für die Ermittlung eines Bemessungsabflusses verschiedene Niederschlagsverteilungen betrachtet werden (LfU, 2012). Trotz der Bedeutung der Nieder-

schlagsverteilung über die Zeit liegen keine neueren Untersuchungen zum charakteristischen zeitlichen Verlauf der Intensitäten für Niederschlagsdauern von 24 bis 72 Stunden vor. Es gibt auch keine gekoppelten Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten maximaler Stundenniederschläge innerhalb längerer Niederschlagsereignisse. Die Statistik der maximalen Stundenniederschläge ist unabhängig von der Genese angegeben und daher meist von Sturzfluten geprägt. Zum Verlauf von Sturzregen - d. h. den kurzen Dauerstufen unter einer Stunde - gibt es hingegen mehrere Untersuchungen. Eine ganz aktuelle hat für Baden-Württemberg eine anfangsbetonte Verteilung abgeleitet (LUBW, 2016). Für die längeren Dauerstufen sind diese Auswertungen jedoch nicht einfach übertragbar. Daher sind für die längeren Dauerstufen die DVWK Empfehlungen der synthetischen Niederschlagsverläufe noch in Verwendung. Die mittenbetonte DVWK-Verteilung wurde aufgrund verschiedener Niederschlaguntersuchungen als Empfehlung für Bemessungsaufgaben definiert. Sie standardisiert den Fall der mittenbetonten Niederschläge, der im Mittel die höchsten Abflüsse erzeugt (DVWK, 1984). Darüber hinaus gibt die DVWK noch den Blockregen und Standardisierungen für anfangs- sowie endbetonte Niederschläge vor. Der Blockregen mit gleichbleibender Intensität ist ungünstig für sehr kleine Gebiete mit kurzen Konzentrationszeiten und wird z. B. in Österreich für Sturzflutenkarten verwendet (BLÖSCHL, 2008). Für die Berechnung mit zeitlich aufgelösten N-A-Modellen müssen die KOSTRA Summen mittels dieser synthetischen Niederschlagsverläufe zeitlich disaggregiert werden. Durch die Zugrichtung der Niederschläge kann aber nicht nur die räumliche Niederschlagsverteilung der Beobachtung ein typisches Muster haben, sondern auch die zeitliche Verteilung im Raum. Auswertungen dieser Zusammenhänge finden sich in der Aufstellung der extremen Hochwasserereignisse der Schweiz unter Berücksichtigung der Genese der Niederschläge unter den vorherrschenden Windrichtungen (STUCKI et al., 2012). Beim Stau an den Alpen werden die voralpinen Bereiche vor den alpinen bzw. inneralpinen Einzugsgebieten überregnet. Der Nachteil der Verwendung von synthetischen Niederschlagsverläufen ist, dass diese spezifischen zeitlichen Muster nicht enthalten sind.

Um sowohl die zeitlich sowie räumlich abhängige Verteilung der Niederschläge, die zu Hochwasser führen, zu berücksichtigen, können Niederschlagsgeneratoren verwendet werden. Die Aufstellung solcher Niederschlagsgeneratoren für die Ableitung synthetischer Ganglinien (EBNER VON ESCHENBACH et al., 2008; BARGAOUI et al., 2015) ist sehr aufwendig. In alpinen und voralpinen Gebieten, die in dieser Studie im Fokus stehen, sind die räumliche Variabilität der Niederschläge und die Fehler in der Messung besonders hoch (BÖHM, 2009). Dies erhöht den Anspruch und erschwert die Anwendung in der Praxis. In der Literatur gibt es noch keine speziellen Untersuchungen oder Empfehlungen zur Erstellung von Niederschlagsgeneratoren für Starkregenereignisse im Alpenraum. Derzeit sind aber einige in der wissenschaftlichen Entwicklung und Validierung.

2 Forschungsfrage und Folgerungen aus dem Stand der Forschung zur Entwicklung einer neuen Methode zur Generierung von Abflussganglinien mittels N-A-Modell für die Wirkungsanalyse von Rückhalteräumen in alpinen und voralpinen Einzugsgebieten durch Standardisierung beobachteter Niederschlagsverläufe

Im letzten Abschnitt konnte gezeigt werden, dass es zwar bereits von Seiten der Wissenschaft neue Ansätze für die Abflusssimula-

tion in unbeobachteten Einzugsgebieten gibt, diese aber derzeit in der Praxis noch nicht die Standardverfahren abgelöst haben. Die neueren komplexeren wissenschaftlichen Methoden können in der Praxis noch nicht einfach angewendet werden (MERZ, 2009) oder stehen für alpine und voralpine Einzugsgebiete noch nicht zur Verfügung.

Die nach DVWK für die Praxis entwickelten synthetischen Niederschlagsverteilungen für die Generierung von Ganglinien mittels N-A-Modell finden in den gängigen Softwareprodukten für Bemessungsaufgaben weiterhin Anwendung. Daher stellt sich die Frage, ob sich die in der Praxis üblichen Berechnungen nicht unter Anwendung von Expertenwissen über die Hochwassergenese verbessern lassen bis die neuen hydrologischen Methoden Einzug in die Praxis gehalten haben. Gesucht wird ein repräsentatives Verfahren zur Generierung von Abflussganglinien für die Wirkungsanalyse von Speichern, das ohne höheren Rechenaufwand in der Praxis angewendet werden kann. Das in der Praxis vorhandene Expertenwissen aus der Analyse abgelaufener Ereignisse soll in die Methode eingebunden werden. Auch die Akzeptanz für Maßnahmen zum Hochwasserschutz in der Öffentlichkeit steigt, wenn Vergleiche zu erlebten Ereignissen gezogen werden können und wenn diese in die Berechnungen mit eingehen.

Zum Expertenwissen zur Hochwassergenese können neben der Analyse vergangener Ereignisse auch die neueren Erkenntnisse über die hochwasserträchtigen Wetterlagen beitragen. Für die regionale und überregionale Speicherwirkung müssen keine Nachweise für bestimmte Jährlichkeit geführt werden, sondern es geht um das generelle Verständnis der Wirkung der Maßnahmen bei extremen Ereignissen (STAHL et al., 2016). Um die zu betrachtende Niederschlagsdauer für diese Fragestellung einzugrenzen, kann die Information genutzt werden, dass Dauerstufen um 36 h relevant sind. Die entwickelte Methodik setzt dann an dieser Stelle an, um das Problem des für diese Dauerstufe zu wählenden Niederschlagverlaufes zu lösen und bietet eine Alternative zu den bisher verwendeten synthetischen Verläufen. Es wird der Frage nachgegangen, ob sich durch die derzeit in der Bemessung etablierte Verwendung der synthetischen Verläufe Blockregen und DVWK-Verteilung mittenbetont systematisch andere Ergebnisse einstellen als bei Verwendung der beobachteten Niederschlagsverläufe. Die Idee ist, dass eine Kombination der Statistik mit gemessenen Hochwasserregen repräsentativere Berechnungsergebnisse erzielt als mit den vorgegebenen synthetischen Verläufen. Dabei wird erwartet, dass durch die Koppelung zwischen Beobachtung und Statistik die Zufälligkeit in der Beobachtung vermindert wird, aber der beobachtete zeitliche Verlauf des Niederschlages erhalten bleibt und somit die Vorteile beider Informationen genutzt werden. Gleichzeitig kann man nach der Normierung für die Pegelinzugsgebiete den natürlichen Verlauf der Niederschläge mit den synthetischen Verteilungen vergleichen, um die Prozesse der Wellenüberlagerung zu analysieren. Die Kalibrierung der PSI aus beobachteten Hochwassern verbessert und vereinfacht die Schätzung und bringt daher große Vorteile in der praktischen Anwendung (DWA, 2012). Da die Schätzung der Abflussbeiwerte aus den Gebietsparametern - wie bereits ausführlich dargestellt - großen Unsicherheiten unterworfen ist, wurde der Schwerpunkt in dieser Untersuchung auf die Kalibrierung gelegt. Auf Grund des Einflusses der Steuerungen können trotz vorhandener Abflusspegel keine statistischen Verfahren angewendet werden, weshalb für die Wirkungsanalyse von Speichern ein Verfahren wie für unbeobachtete Einzugsgebiete gewählt wurde. Die gemessenen Abflüsse erlauben jedoch

eine Kalibrierung, da die Steuerungen aus den Messungen ebenfalls bekannt sind.

Der Unsicherheitsbereich von PSI auf Grund unterschiedlicher Vorsättigung und Niederschlagsverläufe kann anhand von Kalibrierungen an verschiedene gemessene Abflüsse und Niederschläge veranschaulicht werden. Dies wird über einen zusätzlichen ereignisabhängigen Abflussbeiwert-Faktor (PSI-Faktor) beschrieben. Wenn über die Übertragbarkeit von PSI bei N-A-Modellen diskutiert wird; muss auch auf den Einfluss des Flood-Routings auf die Kalibrierung von PSI hingewiesen werden.

Es stellt sich darüber hinaus auch die Frage, inwieweit sich aus den beobachteten Hochwassern auch PSI-Faktoren ableiten lassen, die für Bemessungsaufgaben genutzt werden können. Der Theorie nach wird für die Bemessung angenommen, dass ein N100 auch ein HQ100 erzeugt. Die Analyse abgelaufener Hochwasserereignisse zeigt jedoch, dass bei den großen Hochwasserereignissen 1999 und 2005 in Bayern bei weitem nicht überall der N100 gefallen ist, und dennoch im Abfluss Jährlichkeiten über HQ100 aufgetreten sind (LfU, 2003 und 2007). Für Bayern hat sich in Studien zur Hochwassergenese gezeigt, dass die Bedingungen im Einzugsgebiet, wie Vorsättigung der Böden zusammen mit bereits hohen Anfangsabflüssen im Gewässer, ausschlaggebend dafür sind, dass große überregionale Hochwasser entstehen. Damit ist nicht nur die Jährlichkeit des Niederschlages ausschlaggebend für die Jährlichkeit des Abflusses, sondern dem Abflussbeiwert kommt dabei eine große Bedeutung zu (DWA, 2012).

Da die Anforderungen an die Repräsentativität der für Bemessungsfragen generierten Ganglinien vergleichbar sind mit denen für eine Wirkungsanalyse, soll auch eine Abschätzung der Relevanz der Ergebnisse für Bemessungsaufgaben in komplexeren Einzugsgebieten ohne gültige Pegelstatistik erfolgen.

Das Ziel dieser Studie ist es, diejenige Methode zur Auswahl von Niederschlagsverlauf und Abflussbeiwert(-Faktor) zu bestimmen, die in erster Linie für die Wirkungsanalyse, aber evtl. auch für die Bemessung von Hochwasserrückhalteräumen eine repräsentative Ganglinie erzeugt, d. h. die den typischen Hochwasserablauf möglichst gut wiedergibt. Dies wird anhand der beobachteten und berechneten Abflussscheitel, der Volumina, des Wellenablaufes und der Wellenüberlagerung untersucht. Zusätzlich wird auch exemplarisch ein Vergleich mit statistischen Kennwerten durchgeführt, um zu prüfen, ob das Verfahren geeignet sein könnte, um Bemessungswerte zu schätzen.

3 Neue Methode zur Generierung von Abflussganglinien mittels N-A-Modell für die Wirkungsanalyse von Rückhalteräumen in alpinen und voralpinen Einzugsgebieten durch Standardisierung beobachteter Niederschlagsverläufe

3.1 Überblick Material und Methoden

Es werden verschiedene Berechnungsmethoden der abflusswirksamen zeitlichen Niederschlagsverteilung am Beispiel des Isar-Einzugsgebietes untersucht, um Empfehlungen zu geben, wie Ganglinien mittels N-A-Modell für ein repräsentatives Szenario für eine Wirkungsanalyse von gekoppelten Hochwasserrückhalteräumen abgeleitet werden können. Um eine umfangreiche Wirkungsanalyse durchzuführen, benötigt man komplexe, d. h. flächenaufgelöste hydrologische Modelle zur Generierung der Abflussganglinien (DISSE et al., 2009).

Die auf Grund der Topographie häufigen Nordstausituationen bei Vb (ähnlichen) Wetterlagen machen das Isar-Einzugsgebiet besonders geeignet für die Untersuchung der Sensitivität auf

zeitliche Unterschiede in der Niederschlagsverteilung zwischen angenommenem synthetischem Niederschlagsverlauf und beobachteten Niederschlägen.

Mit ihren zahlreichen Speichern, Ab- und Überleitungen stellt die Isar eines der komplexesten Flusssysteme in Bayern dar (BINDER, 2001). Mit der Steuerung der Abflüsse durch den Sylvensteinspeicher - als wichtigstem Rückhalteraum im Isareinzugsgebiet - sind an der gesamten Isar unterhalb vom Sylvensteinspeicher die Voraussetzungen für eine statistische Auswertung der Abflüsse nicht mehr gegeben. Daher ist die Isar trotz der Einzugsgebietsgröße und vieler Abflusspegel ein geeignetes Flussgebiet, um die Generierung von Ganglinien statt über statistische Methoden mittels N-A-Modell durchzuführen. Die Wirkungsanalyse von Hochwasserrückhalteräumen an der Isar wurde bereits mit der empfohlenen Methode durchgeführt. Es konnte für die Isar gezeigt werden, dass die Methode geeignet ist, um zu untersuchen, wie sich vorhandene und potenzielle Speicher optimal für den Hochwasserrückhalt im gesamten Einzugsgebiet einsetzen lassen (STAHL et al., 2016). In diesem Artikel werden die Vorarbeiten zur Ableitung der Methodik für diese Wirkungsanalyse vorgestellt.

Das N-A-Modell für das Einzugsgebiet der Isar wird nicht nur mit verschiedenen Niederschlagsvarianten angetrieben, zusätzlich werden Abflussbeiwerte und Rauheiten variiert. Um die Scheitel bildenden Prozesse anhand beobachteter Niederschläge und der resultierenden Abflussganglinien zu identifizieren, werden die Ereignisse (1999, 2005 und 2013) nachsimuliert. Im Anschluss werden verschiedene synthetische Ganglinien erzeugt und mit den Charakteristika der Originalhochwasser verglichen. Die Abflussbeiwerte werden über die gemessenen Abflüsse kalibriert. Die Erfahrungen in Bayern zeigen, dass die visuelle Kalibrierung durch einen Experten zwar aufwändiger ist, aber plausiblere Parameterschätzungen ergibt als automatische Verfahren. Umfangreiche systematische Untersuchungen zeigen ebenfalls, dass kein (einzelnes) numerisches Kriterium geeignet ist, die Experteneinschätzung für die beste Übereinstimmung von Simulation mit Messung bei Hochwasserganglinien zu ersetzen (CROCHEMORE et al., 2015). Als Kriterien für die Repräsentativität der synthetischen Ganglinien werden Hochwasserscheitel und Volumina verwendet, da diese Kriterien in der Wirkungsanalyse für die Speicherwirkung herangezogen werden. Zusätzlich wird untersucht, wie sich die einzelnen Verfahren im Wellenablauf und der Wellenüberlagerung im Vergleich zu den abgelaufenen Hochwassern darstellen. Die Analyse der mittels N-A-Modell generierten Ganglinien bezüglich des Wellenablaufes und der Wellenüberlagerung erfolgt für den gesamten Flusslauf der Isar mit den jeweiligen Zuflüssen. Für den Sylvensteinspeicher als wichtigstem bereits bestehendem Speicher im Isareinzugsgebiet (Abb. 1) wird untersucht, welche Einzugsgebiete unter welchen Randbedingungen scheidelbildend wirken. Dafür spielt vor allem die zeitliche Differenz im Auftreten der Scheitel der Zuflüsse eine Rolle. Diese wird geprägt durch die räumliche und zeitliche Niederschlagsverteilung und die Konzentrationszeit im Einzugsgebiet, sowie die Translation und Retention durch das Flood-Routing in der Isar, das maßgeblich mit auf die Wellenüberlagerung zwischen der Isar und den wichtigen Zuflüssen Walchen, Dürrach und Rißbach am Sylvensteinspeicher einwirkt. Es wird auch ein Beispiel zum Einfluss des Flood-Routings vorgestellt, auch wenn das Thema in diesem Artikel nicht abschließend behandelt werden kann. Das Beispiel wurde aus zusätzlichen Variantenrechnungen zum Flood-Routing ausgewählt, die im folgenden Artikel nicht dargestellt werden. Für die Isar unterhalb vom Sylven-

steinspeicher wird die Charakteristik der Wellenüberlagerung der wichtigsten Zuflüsse mit der Isar analysiert. Auf dieser Basis lässt sich dann entscheiden, welche der Methoden zur Generierung der synthetischen Ganglinien die Niederschlagsprozesse bei der Hochwassergenese im Einzugsgebiet am besten wiedergibt. Für das Einzugsgebiet des Sylvensteinspeichers wird darüber hinaus eine weitere Analyse durchgeführt, um die erzeugten Ganglinien auch bezüglich der statistischen Kennwerte zu vergleichen. Die Diskussion zur Eignung der Methode für die Bemessung wird dort exemplarisch durchgeführt, da es im oberen Einzugsgebiet noch möglich ist, diese mit den Werten aus der Statistik zu vergleichen. Für diese Berechnungen wird von KOSTRA-2000 derjenige Niederschlag ausgewählt (N100), der in der statistischen Einordnung dem des gesuchten Hochwassers entspricht (HQ100) und verschiedene PSI getestet.

3.2 Einzugsgebiet der Isar mit Sylvensteinspeicher

Die Isar und ihre Zuflüsse Ammer und Loisach entspringen in den nördlichen Alpen, einer für Niederschläge und Hochwasser hoch dynamischen Region. Diese Lage führt bei Nordstausituationen immer wieder zu starken Hochwasserereignissen, die sich schnell entwickeln (STAHL et al., 2016). Das gesamte Einzugsgebiet der Isar von ihren alpinen Quellen in Österreich bis zur Mündung in die Donau beträgt 8.900 km² - einschließlich ihrer Nebenflüsse Loisach und Amper (BINDER, 2001). Dabei weist sie eine Lauflänge von etwa 280 km bei einem mittleren Gefälle von 3,2 ‰ auf. Im alpin geprägten Bereich bis zum Sylvensteinspeicher mit einem Einzugsgebiet von 1158 km² beträgt das Gefälle sogar teilweise mehr als 8 ‰. Der Jahresniederschlag ist mit über 2.000 mm im alpinen Einzugsgebiet deutlich höher als in den flachen Gebieten nahe der Donau mit unter 700 mm.

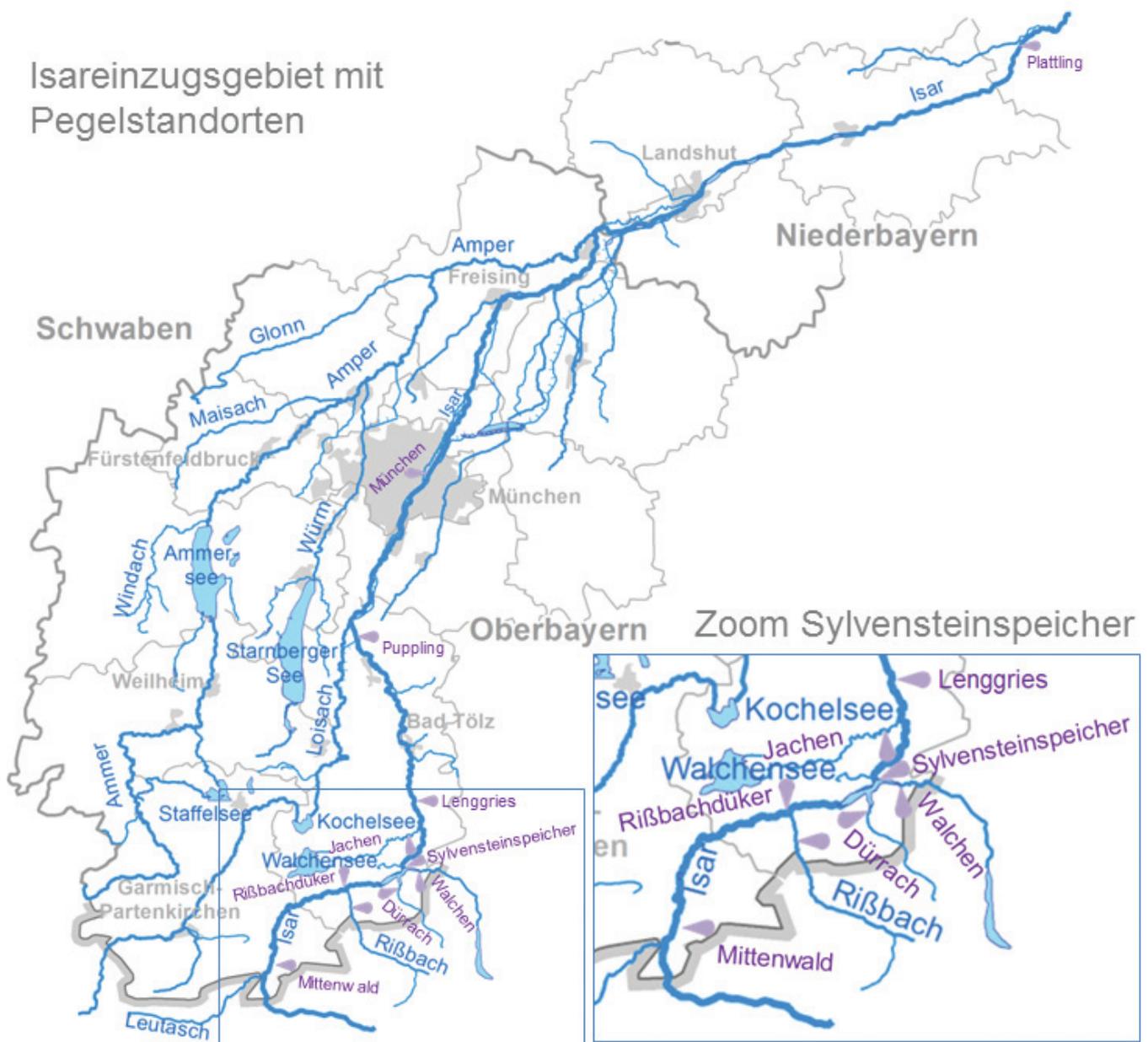


Abbildung 1
Das Isareinzugsgebiet mit ausgewählten Pegeln.
Isar catchment with selected gauges.

Das Einzugsgebiet der Isar ist geologisch und pedologisch sehr heterogen und trägt unterschiedlich stark zur Hochwasserbildung bei. Es erstreckt sich von den Nördlichen Kalkalpen über die Voralpen mit dem Ammer-Loisach-Hügelland bis zum Unterbayrischen Hügelland mit den Isar-Inn-Schotterplatten. Die nördlichen Kalkalpen, sowie die vorgelagerte Flysch- und Helvetikumzone, führen mit ihren zum Teil steilen Hängen zu einer raschen Abfuhr von gefallenem Niederschlag. Der Bereich zwischen den Kalkalpen und der Münchner Schotterebene ist durch eiszeitliche Moränen geprägt. Daher schwankt auch die Durchlässigkeit des Bodens von schwer durchlässig (im Bereich von Ton und Schluff) bis hin zu durchlässig (im Bereich von Kies). Die Münchner Schotterebene besteht aus gut durchlässigen, fluvioglazialen Schottern, so dass gefallene Niederschläge rasch versickern. Als gute natürliche Rückhaltespeicher funktionieren auch die Schotterkörper, die die alpinen Flusstäler füllen. Dazu kommen die großen natürlichen Seen Ammersee, Starnberger See und Kochelsee und die zwar natürlichen, aber zum Teil gesteuerten Seen Achensee und Walchensee. Es gibt an der Loisach, der Ammer und der Amper darüber hinaus noch viele nicht auf HQ100 eingedeichte Überflutungsflächen, die größte davon ist das Murnauer Moos. Das Zusammenspiel dieser natürlichen Wasserspeicher mit dem technischen Rückhalt ist eine besondere Herausforderung bei der Suche nach geeigneten Speicherstandorten im Isareinzugsgebiet.

Die Modellierung wird durch viele anthropogene Eingriffe in das Flusssystem erschwert. Diese bedingen auch, dass Auswertungen nicht mehr die Voraussetzungen für die Statistik erfüllen. Die Ableitungen zum Walchensee und dem zugehörigen Kraftwerk oder die Überleitungen zum Achensee auf Tiroler Seite sind erhebliche Eingriffe in das Fließgewässersystem Isar (BINDER, 2001). Um den negativen Auswirkungen dieser Ableitungen entgegen zu wirken, wurde im Jahr 1959 der Sylvensteinspeicher in Betrieb genommen. Die als Ausgleichsspeicher konzipierte und ca. 15 km südlich von Lenggries gelegene Talsperre (Abb. 1, Zoom) dient in Trockenzeiten der Niedrigwasseraufhöhung der Isar sowie in Zeiten hoher Abflüsse dem Hochwasserschutz für Isar abwärts gelegene Siedlungsgebiete. Die Variabilität der Abflüsse zwischen normalen Bedingungen und Hochwasser ist an den alpinen Flüssen des Einzugsgebietes enorm. An der oberen Isar wird dieser Effekt durch die beschriebenen Ableitungssysteme noch verstärkt, da diese bei Hochwasser z. T. geschlossen werden. So stieg der Abfluss 2005 innerhalb kurzer Zeit von ca. 20 m³/s auf fast 1050 m³/s (HQ100 bis HQ1000) an. Diese hohe Variabilität der Abflüsse stellt das Hochwassermanagement an der Isar vor besondere Herausforderungen. Die Entnahme im Norden Münchens in den Mittleren-Isarkanal stellt eine weitere Besonderheit dar. Hier werden in Summe bis zu 150 m³/s Isarwasser zur energetischen Nutzung sowie zu Kühlwasserzwecken ausgeleitet und erst kurz vor Landshut der Isar wieder zugegeben. Auf der Kanalstrecke selbst befinden sich Speicherräume mehrerer Betreiber (Stadtwerke München und UNIPER Kraftwerke GmbH) sowie weitere Zuleitungen und Ableitungen der Restwasserstrecke. Auf der Restwasserstrecke machen der Amper-Überführungskanal, der Amper-Zufluss und die Ausleitung in die

Flutmulde bei Landshut die Modellierung zusätzlich kompliziert. Auch von Landshut bis Plattling beeinflussen Ein- und Ausleitungen sowie weitere Kraftwerke die Abflüsse. Eine Wirkungsanalyse dieses sehr komplexen Flussgebietes ist ohne eine N-A-Modellierung mit viel Expertenwissen nicht möglich.

3.3 Konzeptmodell LARSIM im N-A-Modus

Für die Herleitung der Ganglinien im Isar-Einzugsgebiet wird LARSIM als N-A-Modell verwendet. Es handelt sich um das in der Praxis für die Hochwasservorhersage von vielen Bundesländern (Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz), Luxemburg, Teilen Frankreichs, Österreichs und der Schweiz genutzte Modell. LARSIM wurde in den 70er Jahren als ein deterministisches Konzeptmodell mit einer flächendetaillierten Auflösung entworfen („Flussgebietsmodell“) (LUDWIG, 1979) und kontinuierlich weiterentwickelt. Das Modell wird in vielen Bereichen – auch an der Isar – inzwischen im Wasserhaushaltsmodus von LARSIM betrieben (BREMICKER, 2013). Für den Vergleich der Verfahren wurde jedoch die für Bemessungsaufgaben übliche Variante als N-A-Modell verwendet, das im Fall der Isar aus hydrologischen Teileinzugsgebieten besteht, die im Mittel 10 km² betragen.

Der Kern des Konzeptmodells liegt in der Beschreibung der hydrologischen Speicher und der Abflusskonzentration (Abb. 2). Diese wird in den Teilgebieten im Wesentlichen über die Gebiets-eigenschaften (Einzugsgebietsgröße, Topografie und Vorflutlänge) abgeleitet und über die Aufteilung auf die verschiedenen Speicher bzw. die Speicherkonstanten kalibriert. Über die Infiltrationsrate (Aufteilungsrate mm/h) wird gesteuert, wieviel Niederschlag in den Boden infiltriert und dem Gewässer verzögert über die Bodenspeicher (Interflow) zugeführt wird und welcher Abfluss als Oberflächenabfluss (in LARSIM als Direktabfluss angesprochen) dem Gewässer direkt zufließt. Der Basisabfluss wird als untergeordneter Prozess im Hochwasserfall konstant gehalten und kann rechnerisch sehr einfach in seiner Wirkung auf das Ergebnis beurteilt werden. Auch der Basisabfluss kann ereignisabhängig vorgegeben werden. Der Wellenablauf im Gerinne wird durch die Querprofilaten gesteuert, die für die Teilgebiete in Form eines Doppeltrapezes hinterlegt sind. Für das Flood-Routing (Translation-Retention-Verfahren) können die kalibrierten Rauheiten des Gerinnes getrennt für Hauptgerinne und Vorland über Faktoren ereignisabhängig modifiziert werden, um jahreszeitliche Veränderungen, die z. B. durch veränderlichen Bewuchs entstehen, zu berücksichtigen.

Rückhaltebecken und Verzweigungen können optional mitberechnet werden, um den Effekt auf die resultierende Abflussganglinie zu zeigen. Für komplexere Steuerregeln und Optimierungen steht in LARSIM das Speichermodul (SPEMO) zur Verfügung, das für die Wirkungsanalyse an der Isar verwendet wird.

Die Berechnungen des Abflusses und des Effektivniederschlags können für die einzelnen Teilgebiete, aber auch für jeden beliebigen Knotenpunkt ausgegeben werden, um die Ergebnisse für übergeordnete Gebiete wie Pegel-einzugsgebiete oder Rückhalträume zu erhalten. Gerechnet wird in Stundenschritten.

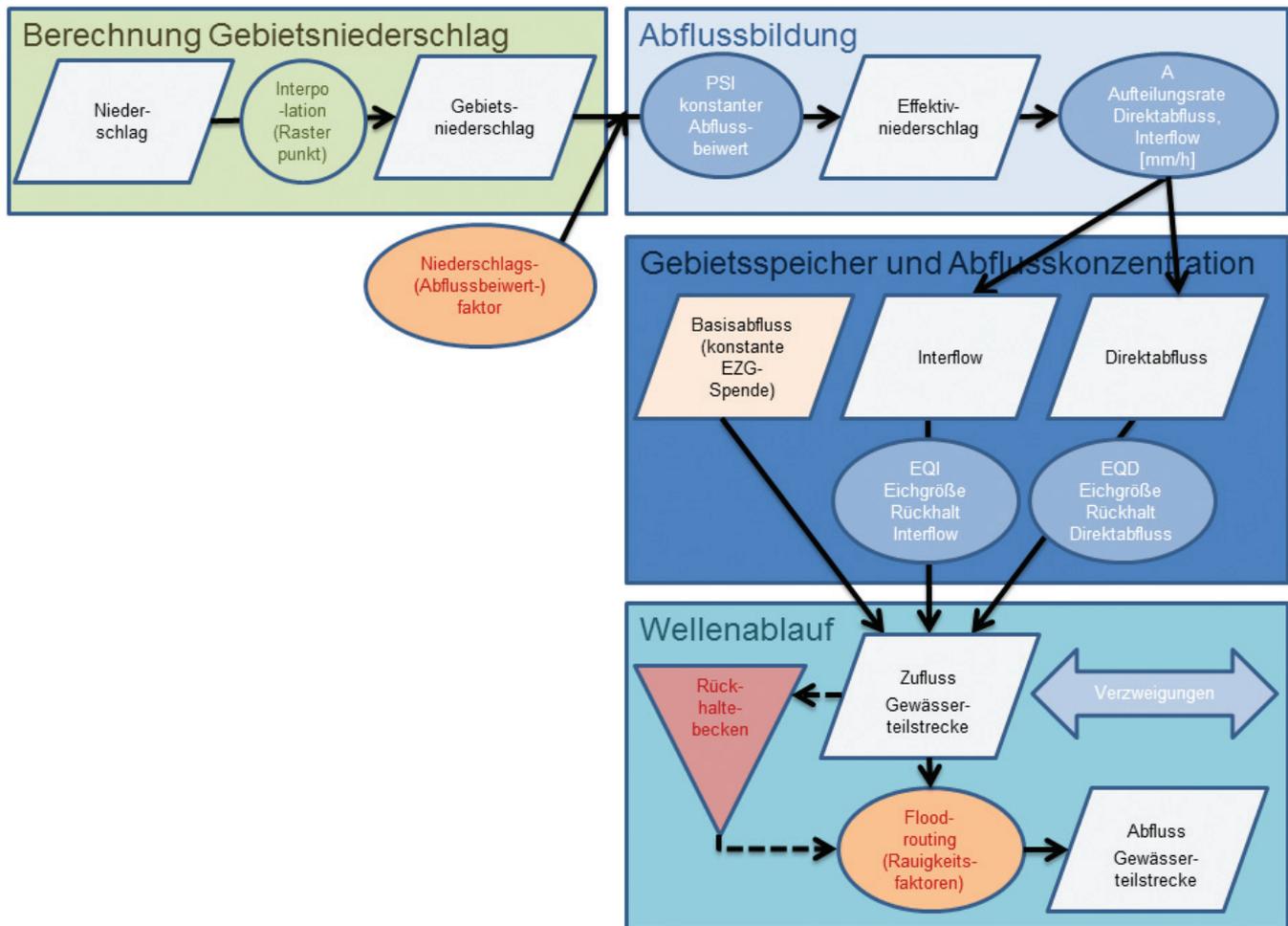


Abbildung 2
 Das Konzeptmodell LARSIM im N-A-Modus mit den Prozessen in den Teilgebieten.
 Concept Model LARSIM using rainfall-runoff mode: hydrological processes in subareas.

3.4 Niederschlag-Eingangsdaten für die N-A-Modellierung

A. Natürliche Niederschläge zur Analyse der Hochwassergese

Um eine möglichst hohe Repräsentativität für die Analyse der Hochwassergese im Isar-Einzugsgebiet zu gewährleisten, werden zunächst die Niederschläge der drei größten Hochwasserereignisse (1999, 2005, 2013) als Input verwendet.

Allen drei Ereignissen ist gemeinsam, dass die höchsten Niederschläge im alpinen bzw. voralpinen Bereich mit über 200 mm gemessen wurden (Abb. 3). Die Stauwirkung ist in der Nähe vom Walchensee besonders stark ausgeprägt. Dies spiegelt sich bei den Ereignisniederschlägen, aber auch in der KOSTRA Auswertung wider. Nach Norden nehmen die Niederschläge in allen Darstellungen ab. Bei den beobachteten Ereignissen ist diese Abnahme nach Nordosten stärker ausgeprägt als nach Nordwesten. KOSTRA liegt im Raum Landshut noch bei 130 bis 150 mm und erstreckt diese Klasse im Osten weiter nach Norden als im Westen. Die gemessenen Niederschläge zeigen also keine generelle Unterschätzung der Niederschläge nach Norden hin, sondern eher zufällig eine Abweichung im Raum Landshut. Dieser Bereich trägt zum Hochwasser der Isar jedoch nur noch gering bei, da-

her sind die Unterschiede dort weniger relevant, als im alpinen und voralpinen Bereich. Die gewählten Ereignisse zeigen also ähnliche Strukturen wie die KOSTRA Niederschläge für die entsprechend hohe Dauerstufe (72 h). Ganz grundsätzlich geben die Niederschläge der Hochwasser von 1999, 2005 und 2013 ebenso wie die KOSTRA Verteilung die starke Staukomponente der Niederschläge an den Alpen wieder mit einer Abnahme nach Norden und zum inneralpinen Bereich. Das gibt Hinweise, dass auch in der zeitlichen Verteilung der Niederschläge die Topographie eine wichtige Rolle spielt, wie in den Berechnungsergebnissen gezeigt wird. Alle drei Ereignisse können dem Typ Tief Mitteleuropa mit Vb (ähnlicher) Zugbahn zugeordnet werden. Sie zeigen für den Kernbereich mit den hochwasserrelevanten Niederschlagsintensitäten über 2 mm/h (Abb. 6) eine gute Übereinstimmung mit der Dauer von 36 Stunden, auch wenn die Gesamtdauer der drei Ereignisse in Abbildung 3 mit 72 bzw. 96 Stunden angegeben ist. Als Niederschlagsdauer wird für die Vergleiche mit KOSTRA daher der 36h-Regen verwendet, der im Mittel dem charakteristischen Hochwasserregen der Vb ähnlichen Wetterlagen entspricht. Auch ältere Hochwasser wie 1940 und 1954 zeigen ähnliche Charakteristiken (LfU, 2003). Allerdings war die Anzahl der Niederschlagsstationen damals noch deutlich geringer - nur ein Zehntel der Stationen im Vergleich zu heute -, weshalb sie für diese Analyse nicht einbezogen wurden. Viele waren auch nur Ta-

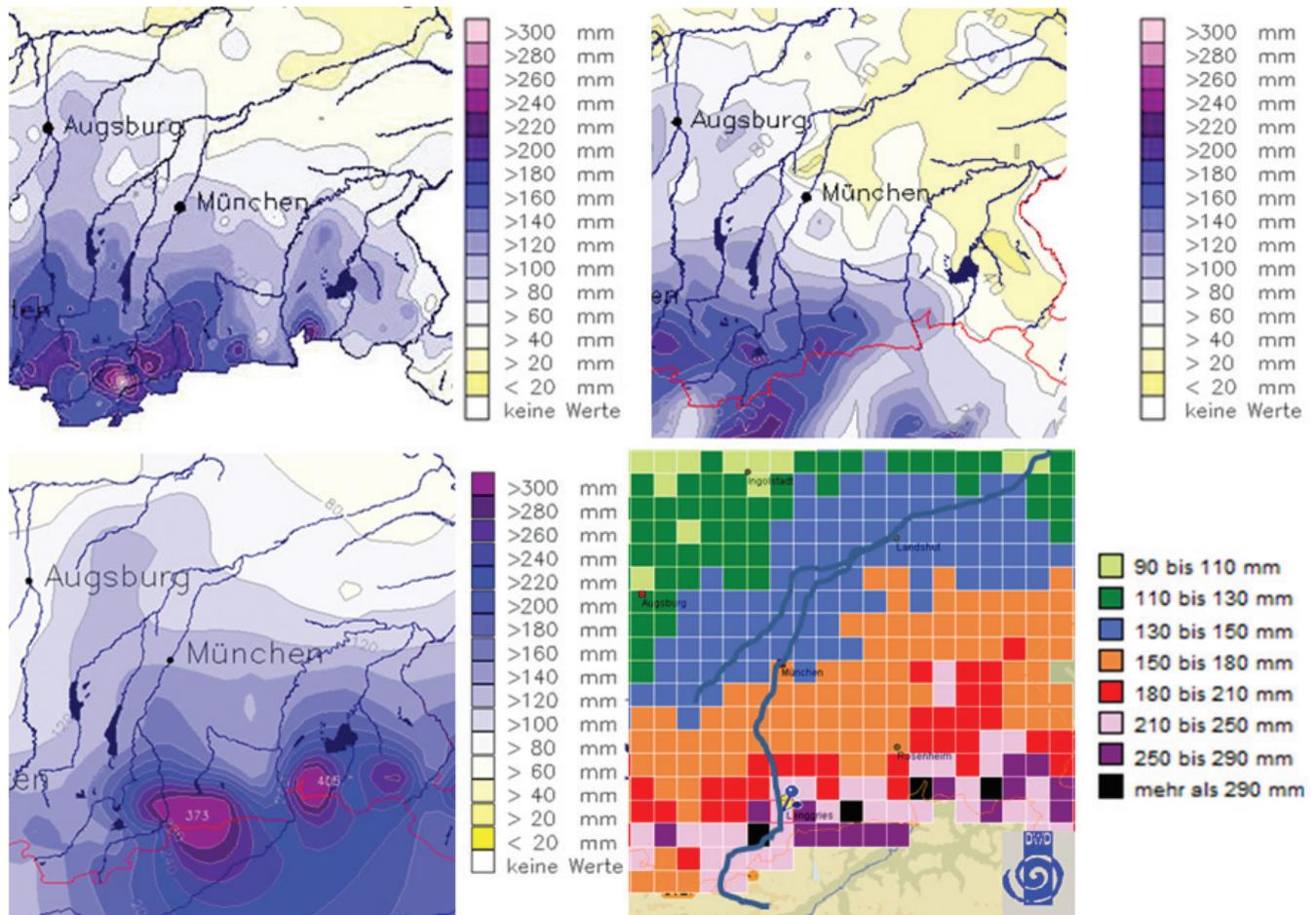


Abbildung 3
 Vergleich der Hochwasserniederschläge von 1999 (oben links LFW 2003), 2005 (oben rechts LFU 2007) (72 Stundensummen), sowie 2013 (unten links LFU 2014) (96 Stundensumme) mit KOSTRA 2000 (72 Stundensumme) (unten rechts).
 Comparison of flood precipitation between 1999 (top left), 2005 (top right), 2013 (bottom left) and KOSTRA (bottom right).

gesstationen, weshalb sie für die Analyse des zeitlichen Verlaufes, die angestrebt wird, nicht geeignet sind. Das Ereignis von 1954 mit hohen Niederschlagssummen über 200 mm entlang des gesamten Isarlaufes zeigt, dass die Abweichung nach Nordosten bei den verwendeten Ereignissen zufällig ist. Für die Simulation stehen 1999 bereits ca. 200 Niederschlagsstationen im Isareinzugsgebiet mit angrenzenden Regionen zur Verfügung. Mit dem Messnetz 2000 wurde in der Zeit danach ein noch weiter verdichtetes Messnetz geschaffen. Die Niederschläge der Wasserwirtschaft in Bayern können im Detail unter „www.gkd.bayern.de“ eingesehen und für Auswertungen heruntergeladen werden. Darüber hinaus wurden Stationen aus dem agrarmeteorologischen Messnetz, vom Lawinenwarndienst, aus Österreich, sowie von lokalen Betreibern (z. B. an Kläranlagen) verwendet. Um den Gebietsniederschlag zu erhalten, werden die gemessenen Originalzeitreihen der Niederschlagsstationen in LARSIM interpoliert (Rasterpunktverfahren).

B. Abgeleitete naturnahe Niederschläge zur Generierung repräsentativer Ganglinien

Um die Niederschläge im Niederschlagsverlauf und in ihrer Wirkung auf die Abflüsse vergleichbar zu machen, werden mit der hier vorgestellten Methode aus den beobachteten Ereignisniederschlägen naturnahe Niederschläge abgeleitet. Dafür wird ein

Faktor benötigt, der parallel zum Abflussbeiwert-Faktor auf den Gebietsniederschlag wirkt und es ermöglicht, die Niederschläge für einzelne Elemente oder auch Pegelkontrollbereiche zu variieren (Abb. 2). Die wichtigen Pegelkontrollbereiche sind in der Beschreibung zu Abbildung 4 namentlich aufgeführt. Die Niederschlagsfaktoren ergeben sich über den Vergleich der LARSIM Gebietssummen mit den KOSTRA-2000 Gebietssummen für den Pegelkontrollbereich. Dafür werden außerhalb von LARSIM aus den KOSTRA-Rastern die statistischen Gebietsniederschlagssummen für einen hundertjährigen Niederschlag (N100) flächenanteilig über die Teilgebiete ermittelt. Mit diesen Faktoren werden die beobachteten Gebietsniederschläge auf die KOSTRA-Summen normiert. Die Niederschlagssumme aus KOSTRA wird verwendet, um die Information zur räumlichen Verteilung aus der Langzeitbeobachtung zu nutzen und um die zufälligen Niederschlagsspitzen der gemessenen Ereignisse zu entfernen. So wird sichergestellt, dass das räumliche Muster der Niederschlagssumme der Statistik (N100) entspricht. Wie Abbildung 3 zeigt, sind die Niederschlagsverteilungen und Summen durchaus vergleichbar, weshalb diese Faktorisierung keine zu großen Veränderungen bei den Originalverteilungen erzeugt. Die größten Faktoren um bis zu 2 treten erst an der Isar ab Landshut auf, wo das Einzugsgebiet sehr schmal und nicht mehr hochwasserbildend ist. Das Ereignis 1954 mit hohen Niederschlägen in dieser Region zeigt, dass hohe

Normierungsfaktoren an der unteren Isar zugelassen werden können, ohne eine untypische Gesamtsituation zu erzeugen. Der Niederschlagsverlauf entspricht nach der Normierung qualitativ weiterhin der Beobachtung, so dass die zeitliche Hochwasser- genese abgebildet werden kann. Nach der Normierung kann man für die Pegeleinzugsgebiete den Verlauf der Niederschläge, nun „naturnaher Verlauf“ genannt, direkt mit den synthetischen Verteilungen vergleichen, da die Niederschlagssummen selbst identisch sind. Da in KOSTRA nur 24 und 48 h Niederschläge vorliegen, wurden diese nach Rücksprache mit dem DWD linear interpoliert, um die 36 h zu erhalten. Im Zusammenhang mit der Anwendung von KOSTRA Daten auf größere Einzugsgebiete für Bemessungszwecke werden Abminderungsfaktoren diskutiert, um der Frage der Gleichzeitigkeit der Niederschläge in verschiedenen Rastern gerecht zu werden. Das Ereignis von 1954 belegt für die Isar die mögliche Gleichzeitigkeit des Auftretens der KOSTRA Niederschläge im südlichen und nördlichen Einzugsgebiet. Mit Zunahme der Dauerstufen zeigen auch systematische Analysen nur noch einen geringen Bedarf für Abminderungsfaktoren (VERWORN, 2008). Angewendet auf die 36 h liegen diese für ein Gebiet von 1000 km² wie beim Sylvensteinspeicher nur bei etwa 10 %. Durch die Verwendung des gemessenen Niederschlagsverlaufes werden mit der vorgestellten Methode Unterschiede im zeitlichen Auftreten der Niederschläge jedoch bereits berücksichtigt und erzeugen Unterschiede von mehr als 10 % bei der gleichen Niederschlagssumme. Für die Wirkungsanalyse müssen keine bestimmten Jährlichkeiten erzeugt werden, daher ist ein Abminderungsfaktor generell vernachlässigbar. Für die Bemessung am Sylvensteinspeicher könnte man ihn verwenden, jedoch zeigen die Ergebnisse, dass andere Parameter bereits eine wesentlich höhere Varianz erzeugen.

C. Synthetische Niederschläge nach den DVWK-Regeln für die Bemessung HQ100

In einem dritten Schritt werden synthetische Niederschläge aus der Bemessung den natürlichen und naturnahen Niederschlägen gegenüber gestellt. Als Bemessungsniederschlag wird analog der Ableitung der naturnahen Niederschläge die 36h-Niederschlagssumme mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren aus KOSTRA-2000 ausgewählt. Zur Erzeugung synthetischer Bemessungsniederschläge werden diese mit zwei Methoden zeitlich disaggregiert:

- Blockregen: Konstanter 36 h Niederschlag
- DVWK-Verteilung mittenbetont: 20 % Niederschlag (NS) im ersten Intervall (30 % t), 50 % NS im zweiten Intervall (20 % t), 30 % NS im dritten Intervall (50 % t)

LARSIM ermöglicht das direkte Einlesen von KOSTRA Niederschlagsrastern für verschiedene Dauerstufen und führt die Interpolation auf die Teilgebiete durch, sowie die Disaggregation mittels Blockregen oder DVWK-Verteilung.

Für alle drei Methoden wird mit LARSIM für jedes Teilgebiet der effektive Niederschlag berechnet, der sich für das Teilgebiet unter Berücksichtigung eines konstanten Abflussbeiwertes (PSI) ergibt (Abb. 2). Es ergeben sich insgesamt für jede Methode weitere Berechnungsvarianten, da verschiedene PSI getestet werden (Kap. 3.6 und 3.8), die zu unterschiedlichen effektiven Niederschlägen führen.

3.5 Kalibrierung des N-A-Modells

Das Modell wurde anhand der vorhandenen Informationen über die Einzugsgebiete aufgestellt und - wo vorhanden - an gemessenen Pegel-

sen Pegeldaten kalibriert. Die meisten Parameter sind durch die Gebieteigenschaften vorgegeben und müssen nur einmal bei der Aufstellung des Modells angepasst werden, sie sind in Abbildung 2 blau dargestellt und wurden für diese Studie nicht verändert. Die Parameter, die zwischen den Ereignissen variabel sind und als Stellschrauben für die Ereignisanpassung verwendet werden können, sind orange hinterlegt. Der Basisabfluss wird als Eingangsgröße für das Ereignis vorgegeben und ist daher auch orange gefärbt.

Ein flächendetailliertes PSI wurde bei der Modellerstellung unter Berücksichtigung der Gebieteigenschaften abgeleitet und mit Schwerpunkt auf die mittlere Hochwasserabflussreaktion über den Vergleich mit langjährigen Pegelmessungen kalibriert. Die EGAR Daten lagen bei der Aufstellung des Modells noch nicht vor und wurden auch nur für die Wildbacheinzugsgebiete herausgegeben, weshalb sie für die Studie mit Fokus auf das gesamte Einzugsgebiet keine Verwendung gefunden haben.

Der ereignisabhängige PSI (in den Ergebnissen Ereignis-PSI genannt) ergibt sich durch flächendetaillierte Multiplikation des PSI aus der Modellerstellung mit den ereignisabhängigen PSI-Faktoren, die über die Kalibrierung an die im speziellen Ereignis gemessenen Ganglinien ermittelt wurden. Durch diese PSI-Faktoren kann eine veränderte Reaktion durch besondere Vorfeuchtebedingungen oder auf andere Niederschlagssummen oder Intensitäten berücksichtigt werden. Es kann auch an einen unterhalb gelegenen Pegel kalibriert werden, wenn im gesuchten Teilgebiet keine Messungen vorliegen. Um die Abflusswirkung unterschiedlicher Eingangsniederschläge im zeitlichen Verlauf besser vergleichen zu können, wird der Abflussbeiwert in dieser Untersuchung zeitlich konstant gehalten. Dies vereinfacht auch die Skalierbarkeit der Eingangsniederschläge für die Generierung von Ganglinien, da die Beziehung zum Abfluss linear bleibt. Die Verwendung eines konstanten Abflussbeiwertes statt einer Abflussbeiwertfunktion (PSI abhängig von der Bodensättigung, die mit Niederschlagsintensität und -dauer zunimmt) hat keine Auswirkung auf die Schätzung des Scheitels, wenn die Kalibrierung von PSI für den Scheitel erfolgt. Für die Wirkungsanalyse gesteuerter Rückhalteräume stehen die Bedingungen im Scheitel im Fokus. Daher wurde im konkreten Fall der Isar dem zeitlich konstanten PSI der Vorzug gegeben gegenüber einer Abflussbeiwertfunktion, um die Ergebnisse durch die lineare Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss eindeutiger auf die Auswirkungen verschiedener Niederschlagsverläufe interpretieren zu können. Diese Vereinfachung bedingt aber eine Veränderung im ansteigenden Ast und eine Überschätzung der Gesamtvolumina der Wellen, da mit einem konstanten PSI die Abflussreaktion in der anlaufenden Welle so hoch wie im Scheitel ausfällt, während zu diesem Zeitpunkt der Boden meist noch nicht gesättigt ist. Für die Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken erhält man mit dem konstanten auf den Scheitel kalibrierten Abflussbeiwert keine mittleren Volumen, sondern die Maximalschätzung aufgrund dessen, dass bereits zu Beginn gesättigte Böden parametrisiert sind. Für Bemessungsaufgaben oder für ungesteuerte Rückhaltebecken kann abweichend von dem vorgestellten Ansatz in LARSIM eine Abflussbeiwertfunktion verwendet werden, die die Anfangsverluste im ansteigenden Ast besser berücksichtigt.

3.6 Übersicht über die Berechnungsvarianten mit Ermittlung des Unsicherheitsbereiches durch die PSI-Kalibrierung

Um den Einfluss der PSI-Kalibrierung zu quantifizieren, werden zum einen die PSI aus der Kalibrierung an die jeweiligen Einzeler-

eignisse (Ereignis-PSI) verwendet, zum anderen ein mittlerer PSI (MW-PSI), der sich durch Mittelung der PSI aus den einzelnen Ereignissen (größte Hochwasser 1999, 2005 und 2013) und dem PSI aus der Modellerstellung (Anpassung auch für kleinere Hochwasser) berechnet (dargestellt sind in Abb. 4 die PSI nach Multiplikation mit dem PSI-Faktor).
 Im alpinen Bereich geben die Abflussbeiwerte die höhere Abflussreaktion als in der Schotterebene wieder. Diese typische

Einzugsgebietscharakteristik wird auch bei der Kalibrierung an die Vorbedingungen von Einzelereignissen nicht überprägt wie Abbildung 4 entnommen werden kann. PSI von 1 treten an den Seeflächen auf, bei denen der ganze Niederschlag abflusswirksam wird. Darüber hinaus kommt es bei der Kalibrierung von PSI zum Ausgleich von Defiziten in der Niederschlagserfassung, die sich mit PSI über 1 auswirken können. In 2013 gab es z. B. an der Jachen eine Niederschlagsstation, die den Niederschlag durch

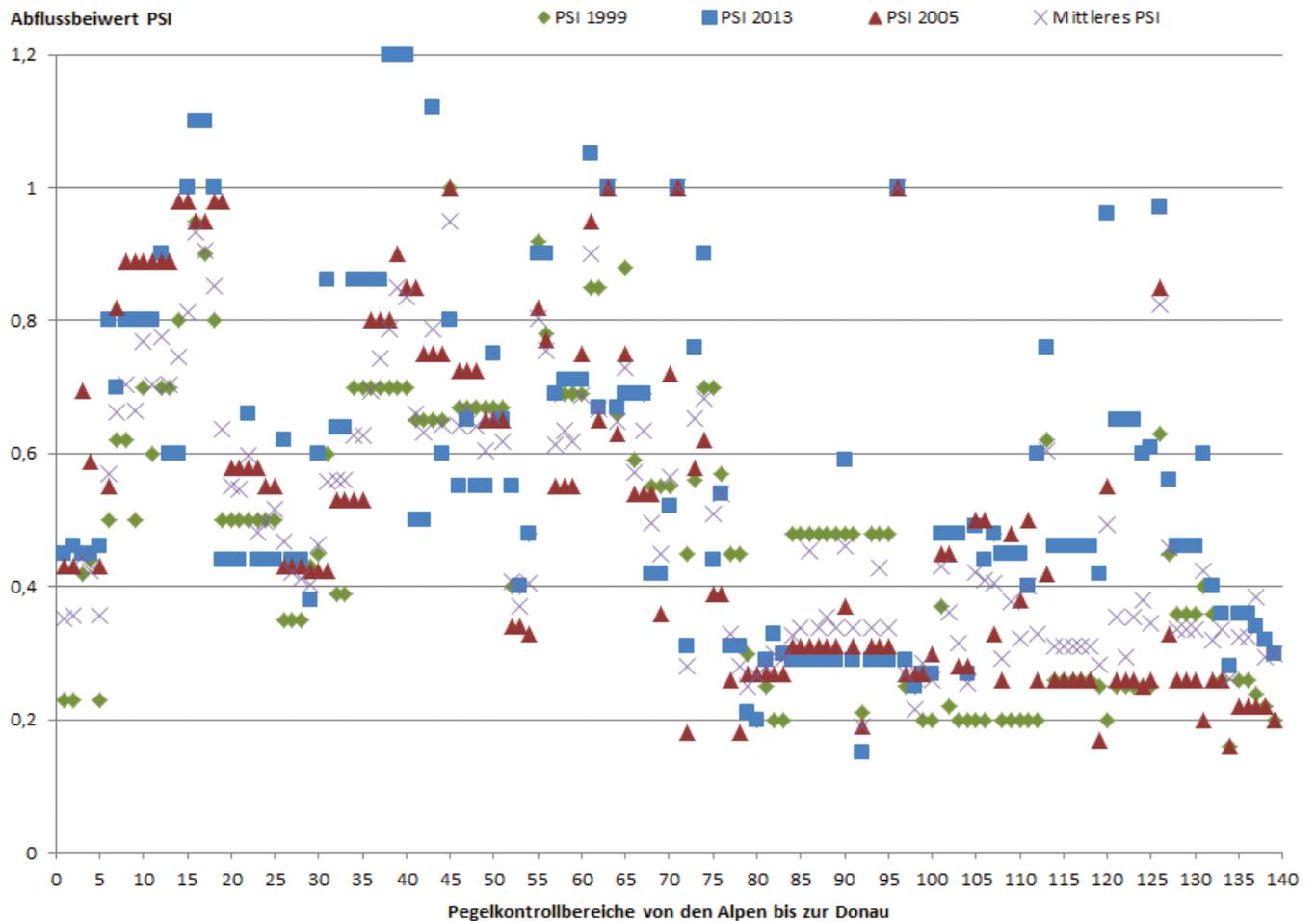


Abbildung 4
 Vergleich der PSI für die Einzelereignisse mit dem mittleren PSI.
Runoff coefficient comparison single event coefficient with mean coefficient.

2	Isar Pegel Scharnitz	15	Walchensee	55	Linder mit Elmaubach
4	Leutasch	18	Jachen	56	Ammer Pegel Oberammergau
5	Isar Pegel Mittenwald	19	Isar Pegel Lenggries	63	Staffelsee
6	Isar Pegel Rissbachdüker	28	Isar Pegel Puggling	65	Ammer Pegel Weilheim
7	Pegel Rissbach	29	Loisach Pegel Ehrwald	70	Ammersee
9	Isar Rissbach bis Dürrach	36	Loisach Pegel Garmisch-Partenkirchen	79	Amper Pegel Fürstenfeldbruck
10	Pegel Dürrach	45	Loisach Pegel Kochelsee	132	Isar Pegel Landshut
12	Pegel Walchen	51	Loisach Pegel Beuerberg	137	Isar Pegel Landau
		53	Isar Pegel München		

Abbildung 4, Erläuterungen
 x-Achse: Namentliche Liste der ausgewählten Pegelkontrollbereiche.
Explanation x-axis: list with the names of some gauge controlled areas.

Überlauf des Behälters nicht mehr richtig erfasst hat. Die korrekte Summe konnte nicht mehr rekonstruiert werden. Da Abflussbeiwert-Faktor und Niederschlagsfaktor in LARSIM beide dieselbe mathematische Auswirkung auf die Berechnung des Effektivniederschlags haben, muss dieser nicht bekannte Fehler nicht an der Station korrigiert werden, sondern kann indirekt über den Abflussbeiwert-Faktor erfolgen. Weitere PSI über 1 ergab die Kalibrierung für 2013 im Bereich des Murnauer Moores und bei den Moosflächen oberhalb des Staffelsees.

Diese geringen Abweichungen über 1 wurden auf Grund der hohen Vorsättigung der Moosflächen als Modellfehler toleriert. Auffällig sind 2013 auch hohe Abflussbeiwerte an der unteren Isar im Vergleich zu 1999 und 2005. Das zeigt die Abhängigkeit des Abflussbeiwertes von der Niederschlagssumme, die in dieser Region in 2013 im Vergleich zu den anderen Ereignissen fast doppelt so hoch war (Abb. 3). Mit Blick auf das gesamte Einzugsgebiet gibt das flächendetaillierte mittlere PSI die Tendenzen der unterschiedlichen Abflussbereitschaft der Pegelkontrollbereiche wieder und die Kalibrierungen an die Einzelereignisse zeigen die starke Varianz zwischen den Ereignissen. Mit diesen PSI werden Berechnungen mit den Originalniederschlägen, den naturnahen und den synthetischen Niederschlägen durchgeführt. Dies wird für die Hochwasser 1999, 2005 und 2013 durchgeführt. Es werden dann die Ergebnisse, die auf diese Weise mit den unterschiedlichen Methoden berechnet werden, gegenübergestellt. Durch die verschiedenen Berechnungen wird der Unsicherheitsbereich abgebildet. PSI wirkt bei der Kalibrierung ebenso wie die Rauheiten auf die Scheitelhöhen ein. Deshalb wird auch der Einfluss des Flood-Routings in Zusammen-

hang mit den PSI untersucht. Um die Varianz des Flood-Routings im Wellenablauf abzubilden, werden die Rauheiten durch ereignisabhängige Rauigkeitsfaktoren (Wertebereich +/- 0,5) für das jeweilige Ereignis kalibriert. Dies ist nur für Ereignisse und Pegelkontrollbereich durchgeführt worden, bei denen vermutet wurde, dass das entsprechende Gewässerprofil von Veränderungen im Vergleich zum Eichzustand betroffen ist. Diese Kalibrierung der Rauigkeit führt auch bei Verwendung eines mittleren PSI und der gleichen Niederschlagsverläufe für die verschiedenen Ereignisse zu deutlich unterschiedlichen Scheitelwerten. Ein alternatives Verfahren des Flood-Routings nach Williams wurde ebenfalls getestet (WILLIAMS, 1969). Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen sind auf Grund des Umfangs nicht dargestellt. Um den Einfluss der Rauheiten auf die Ergebnisse nicht zu vernachlässigen, wird er jedoch kurz exemplarisch an einem Ereignis dargestellt und in der Diskussion berücksichtigt. Eine Übersicht über die sich daraus ergebenden Berechnungsvarianten fasst Tabelle 1 zusammen.

3.7 Standardisierung des Anfangsabflusses

1999 und 2013 gab es jeweils eine kleine Vorwelle, die durch eine Phase mit Niederschlägen vor der Hauptwelle entstanden ist. Diese Niederschläge beeinflussen die Hauptwelle dadurch, dass das Ausgangsniveau der Abflüsse zu Beginn des zu vergleichenden 36 h-Intervalls höher ist. Bei Bemessungsaufgaben wird der Anfangsabfluss für das HQ100 in Bayern auf das MQ festgelegt (LfU, 2012). Um die Wirkung der Niederschlagsverteilungen auf den Abfluss besser vergleichen zu können, wird der Anfangsabfluss daher zu Beginn der 36 h für alle Ganglinien auch auf das MQ festgelegt.

Tabelle 1

Übersicht über die dargestellten Ganglinien (Berechnungsvarianten).
Calculation ensemble: overview of the presented hydrographs.

Kalibrierung: Nachsimulation der Ereignisse 1999, 2005 und 2013 mit jeweils optimierten PSI-Faktoren und Flood-Routing-Faktoren (nicht dargestellt)
1-3 Standardisierte Ganglinien der Ereignisse 1999, 2005 und 2013 mit dem jeweiligen Ereignis-PSI und naturnahe Niederschlagsverlauf (Abb. 7 Abfluss norm. NS)
4-6 Standardisierte Ganglinien der Ereignisse 1999, 2005 und 2013 mit mittlerem PSI und naturnahe Niederschlagsverlauf (Abb. 7 Abfluss norm. NS (MW PSI))
7-9 Standardisierte Ganglinien der Ereignisse 1999, 2005 und 2013 mit dem jeweiligen Ereignis-PSI und Blockniederschlag (Abb. 7 KOSTRA Abfluss (Blockregen))
10-12 Standardisierte Ganglinien der Ereignisse 1999, 2005 und 2013 mit mittlerem PSI und Blockniederschlag (Abb. 7 KOSTRA Abfluss (Blockr. MW PSI))
13-15 Standardisierte Ganglinien der Ereignisse 1999, 2005 und 2013 mit dem jeweiligen Ereignis-PSI und DVWK-Verteilung (Abb. 7 KOSTRA Abfluss DVWK)
16-18 Standardisierte Ganglinien der Ereignisse 1999, 2005 und 2013 mit mittlerem PSI und DVWK-Verteilung (Abb. 7 KOSTRA Abfluss (Abb. 7 DVWK MW PSI))
19-21 Standardisierte Ganglinien des Ereignisses 1999 mit mittlerem PSI und Flood-Routing - Faktoren wie 2013 für naturnahe Verlauf, Blockregen und DVWK-Verteilung
22-25 Standardisierte Ganglinien des Ereignisses 1999 mit dem Ereignis-PSI und Flood-Routing - Faktoren wie 2013 für naturnahe Verlauf, Blockregen und DVWK-Verteilung

4. Beobachtete Hochwasser 1999, 2005 und 2013, Jährlichkeiten und Niederschlagsverlauf am Beispiel des Sylvensteinspeichers

4.1 Jährlichkeiten der Niederschlagssumme und der Abfluss

Tabelle 2 Hochwasserscheitelabflüsse und Niederschlagssummen über 36 h und über die Gesamtdauer des Ereignisses für das EZG des Sylvensteinspeichers. <i>Flood peaks and rainfall sum over 36 h and the entire event sum for the catchment of Sylvenstein reservoir.</i>				
Datum	Scheitelabfluss	Niederschlagssumme über 36 Stunden	Niederschlagssumme über das Gesamtereignis	
	Abfluss m ³ /s	Niederschlag mm	mm	(Dauer) mm
Ereignis 1999	920	171	194	70 h
Ereignis 2005	1030	141	151	78 h
Ereignis 2013	674	137	200	90 h
Bemessungswert HQ100	950	196		

Die Niederschlagssummen sind für das gesamte Einzugsgebiet in Abbildung 3 dargestellt. Für die vorgestellte Untersuchung wird jedoch neben der Niederschlagssumme von einem wichtigen Einfluss des Niederschlagsverlaufes auf die Hochwasserbildung ausgegangen. Daher wird für die Anwendung der Methode eine Analyse des Niederschlagsverlaufes für den Sylvensteinspeicher vorangestellt mit Bezug zu den beobachteten Jährlichkeiten und im Vergleich zu den synthetischen Niederschlagsverläufen. Die Jährlichkeiten des gesamten Isareinzugsgebietes und weitere

Niederschlagsverläufe können den ausführlichen Hochwasserberichten zu den Einzelereignissen entnommen werden (LFW, 2003; LFU, 2007; LFU, 2014). Am Sylvensteinspeicher zeigen die größten Hochwasser der letzten Jahre im Mai 1999 (920 m³/s) und August 2005 (1.030 m³/s) Scheitelabflüsse im Bereich des HQ100. Ein HQ100 von 950 m³/s ergibt sich aus der Pegelstatistik einer relativ kurzen Zeitreihe (1959 bis 1991) und berücksichtigt die in Tabelle 1 genannten Ereignisse noch nicht. Diese Zeitreihe ist daher vorerst nur bedingt geeignet, das HQ100 zu schätzen (DWA, 2012) und es wird von einem Unsicherheitsbereich von mind. 20 bis 30 % ausgegangen. Auch das Ereignis Juni 2013 mit 674 m³/s Zufluss liegt demnach noch im Unsicherheitsbereich von 30 %. Um den großen Unsicherheitsbereich abzubilden, wird auch dieses Ereignis trotz der deutlich niedrigeren Scheitel für den Vergleich der Jährlichkeit 100 berücksichtigt. Das Hochwasser 2013 unterscheidet sich darüber hinaus von den anderen Ereignissen in der Wellenform und beruht auf einer anderen Niederschlagscharakteristik (Abb. 5). Es ist vom Typ des Niederschlagsverlaufes gut mit dem Blockniederschlag vergleichbar (Abb. 6).

Angewendet auf das Beispiel am Sylvensteinspeicher beträgt der flächeninterpolierte N100 (KOSTRA) für das Einzugsgebiet etwa 195 mm als 36-h-Summe. Die 36-h-Summen der interpolierten gemessenen Niederschläge der Hochwasser lagen 2005 (141 mm) und 2013 (137 mm) deutlich darunter. In 1999 wurde mit 171 mm die höchste Summe erzielt und annähernd der N100 erreicht (Tab. 2). Betrachtet man nur die Niederschlagssummen, ist zu erwarten, dass das Ereignis 1999 am nächsten am HQ100 lag und die Ereignisse 2005 und 2013 deutlich darunter. Diese These passt für 1999 und 2013. 2005 zeigt entgegen dieser Erwartung die höchsten Abflüsse, dies allein ist also durch die Niederschlagssumme in 36 h nicht zu erklären. Auch die Niederschlagsgesamtsumme - mit den geringen Niederschlägen vor und nach den 36 h - kann die Unterschiede in den Spitzenabflüssen nicht besser erklären. Dies bestätigt, dass

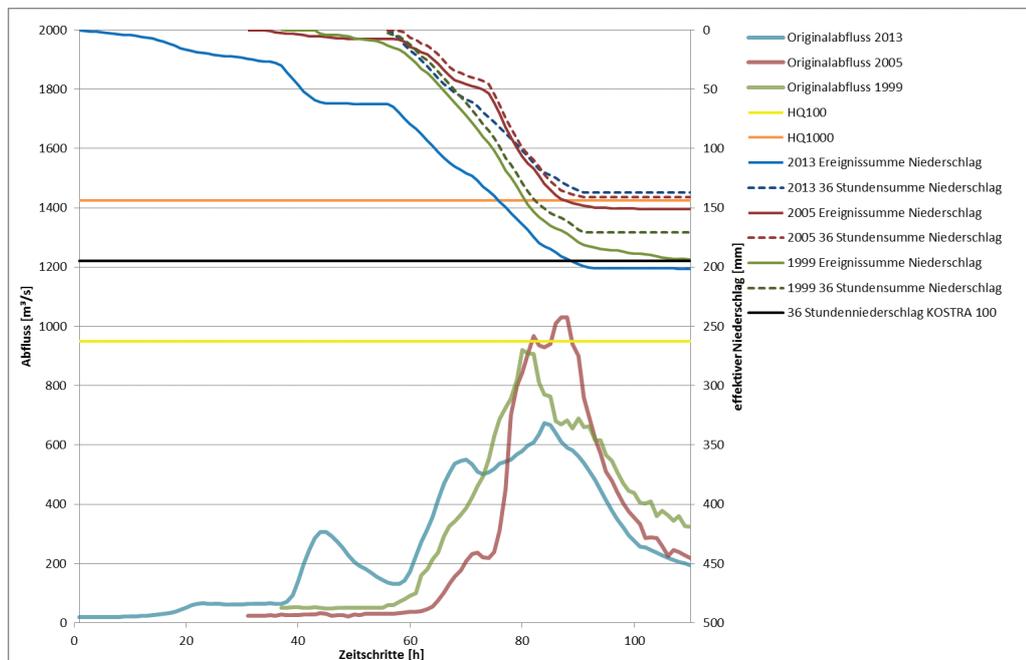


Abbildung 5
Hochwasserzuflussganglinien und Gebietsniederschläge 1999, 2005 und 2013 am Sylvensteinspeicher im Vergleich zu den Jährlichkeiten HQ100 und N100.
Flood discharge and areal rainfall 1999,2005,2013 at Sylvenstein reservoir in comparison to statistical discharge HQ100 and rainfall N100.

die Beschränkung auf die 36 h mit den höheren Intensitäten beibehalten werden kann.

4.2 Vergleich des Niederschlagsverlaufs der beobachteten Ereignisse

In die folgende Analyse der Ereignisniederschläge werden zum Vergleich die Standardverteilungen Blockregen und DVWK-Verteilung einbezogen. Im direkten Vergleich zu den synthetischen Verteilungen zeigen sich bei den beobachteten Niederschlägen stärkere Variationen in der Intensität.

Der Niederschlagsverlauf von 1999, bei dem die Niederschlagsintensität relativ konstant bei 2 bis 6 mm/h und im Spitzenbereich bis knapp 10 mm/h lag, erzeugt am ehesten das HQ100. Diese Verteilung ähnelt durch die Ausbildung eines Spitzenbereichs der DVWK-Verteilung, ist aber mehr endbetont und insgesamt etwas ausgeglichener, wie Abbildung 6 zeigt. Die Verteilung der Niederschläge 2013 ähnelt mehr dem Blockniederschlag und die Intensitäten liegen zwischen 2 und 5 mm/h ohne größere Spitzen. 2005 traten die stärksten Variabilitäten in den Stundenintensitäten auf. Die Niederschläge gingen kurzfristig auf nur 1 mm/h zurück, stiegen aber auch auf ca. 11,5 mm/h an. Die Abbildung 6 gibt einen Hinweis, dass die Stundenintensitäten einen großen Einfluss auf die Scheitelbildung ausüben. Durch die unterschiedlichen Niederschlagssummen sind die Ergebnisse jedoch noch nicht direkt vergleichbar.

5. Ergebnisse

5.1 Vergleich der standardisierten Abflussganglinien für den Sylvensteinspeicher

Für die Berechnung der Abflüsse, die aus den KOSTRA N100 Niederschlagssummen resultieren, wurde ein mittlerer Abflussbeiwert (MW PSI), sowie ein an das Ereignis angepasstes PSI (Ereignis-PSI) verwendet. Die unterschiedliche Wirkung des Niederschlagsverlaufes wird in Abbildung 7 veranschaulicht. Auch bei gleichem PSI und gleicher Niederschlagsverteilung (z.B. DVWK) kommt es auf Grund der Kalibrierung des Flood-Routings zu Unterschieden in den Ergebnissen (vgl. Kap. 3.6), wie ebenfalls Abbildung 7 entnommen werden kann. Für die Übersichtlichkeit sind die Effektivniederschläge auf der Sekundärachse nur mit mittlerem PSI dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der mittlere Abflussbeiwert (MW PSI) (Abb. 7a) nicht generell besser geeignet ist, Scheitel zu erzeugen, die näher am HQ100 liegen als durch die Abflussbeiwerte, die durch Anpassung der Abflussbeiwert-Faktoren an das einzelne Ereignis bestimmt wurden (Abb. 7b). Beim Blockregen, der insgesamt für das Einzugsgebiet

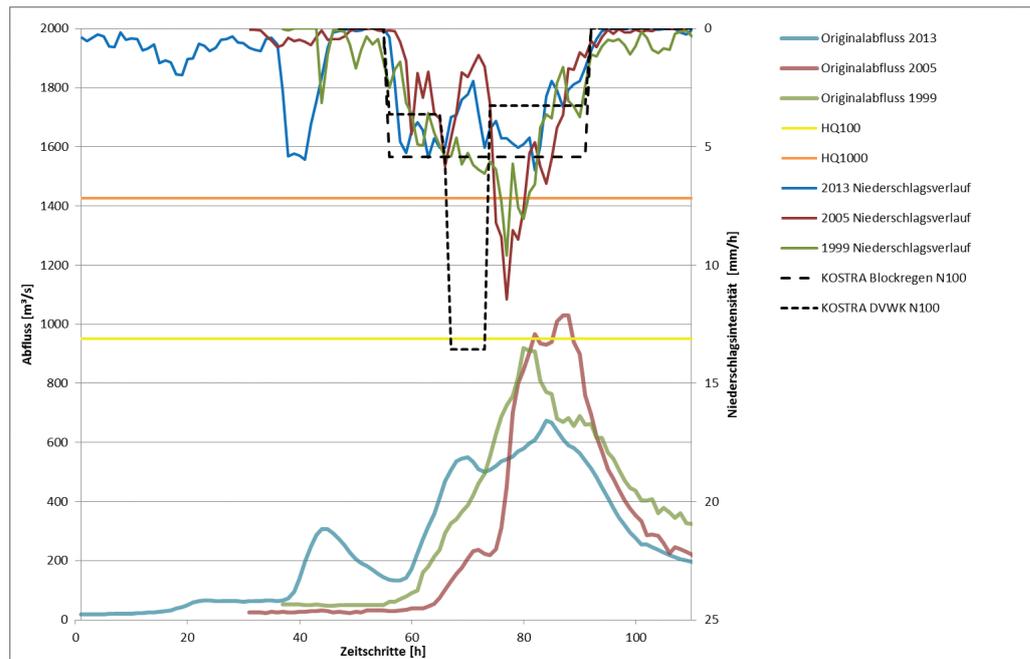


Abbildung 6 Niederschlagsverlauf und Abflüsse der wichtigen Hochwasserereignisse im Vergleich mit dem Niederschlagsverlauf als Blockregen und DVWK-Verteilung nach KOSTRA N100. *Rainfall sequence and discharge of the most important floods comparing with two synthetic rainfall sequences (uniform and DVWK) N100.*

des Sylvensteinspeichers eher zu einer Unterschätzung führt, erzeugen die Ereignis-PSI von 2005 und 2013 höhere Abflüsse und damit bessere Anpassungen. Bei der DVWK-Verteilung ist es umgekehrt, das mittlere PSI gleicht besser aus, dass die Abflüsse eher überschätzt werden. Das Ereignis 1999 fällt aus dieser Systematik heraus, die Ereignis-PSI sind hier deutlich niedriger als das mittlere PSI. Es stellt sich daher die Frage, ob die niedrigeren Abflussbeiwerte erklärt werden können. Auffällig ist, dass 1999 der Wellenablauf im Modell schneller erfolgen muss, um das Ereignis in LARSIM nachzubilden. Dafür wurden geringere Rauheiten des Gerinnes angenommen. Der beschleunigte Wellenablauf kann darin begründet sein, dass das Ereignis früher im Jahr stattgefunden hat, als noch weniger Vegetation auf den Schotterflächen vorhanden war. Möglicherweise wird dadurch aber auch ausgeglichen, dass das noch weniger Stationen umfassende Niederschlagsmessnetz die Niederschlagsverteilung raum-zeitlich ungenügend beschrieben hat. Die Ursache kann daher nicht eindeutig zugeordnet werden. Als Folge der Beschleunigung des Wellenablaufs ändert sich jedoch auch der Scheitelabfluss. Der beschleunigte Wellenablauf führt 1999 bei der DVWK-Verteilung trotz ansonsten gleicher Parameter zu einem um 200 m³/s höheren Scheitel als 2005 und 2013, wie Abbildung 7a zeigt. Rechnet man mit der gleichen Rauheit wie 2013, fällt die Differenz im Scheitel weg (Abb. 8). Bei der Verwendung der Ereignis-PSI wird der schnellere Wellenablauf durch eine geringere Abflussbereitschaft ausgeglichen, um die Scheitelhöhe beizubehalten. Daher erzeugen die Ereignis-PSI in Abbildung 7b andere Verhältnisse der Rechenläufe zueinander als die mittleren PSI in Abbildung 7a. Die Ergebnisse zeigen, dass man, wenn man mit unterschiedlichen Rauheiten arbeitet, bei der Verwendung eines mittleren PSI beachten muss, dass die Parameter in LARSIM stark interagieren. Die Abflussscheitel aus der Schätzung mit dem naturnahen Niederschlagsverlauf in Abbildung 7 unterscheiden sich dar-

über hinaus vor allem im zeitlichen Auftreten im Vergleich zu den beiden synthetischen Verteilungen. Die Scheitel aus den naturnahen Niederschlagsverläufen liegen trotz der sehr unterschiedlichen Ausprägungen alle zeitlich nahe zusammen

und treten später auf als bei der DVWK-Verteilung, aber früher als beim Blockregen. Wie sich das auf den Wellenablauf auswirkt, wird in Kapitel 5.3 untersucht.

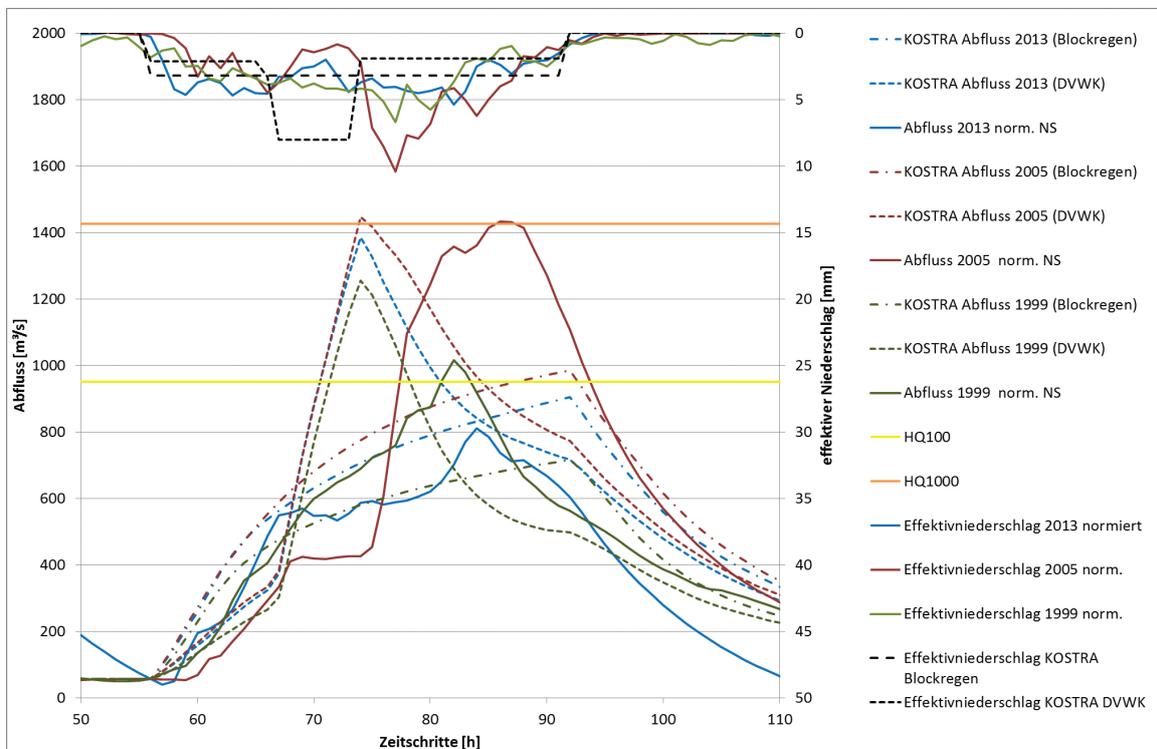
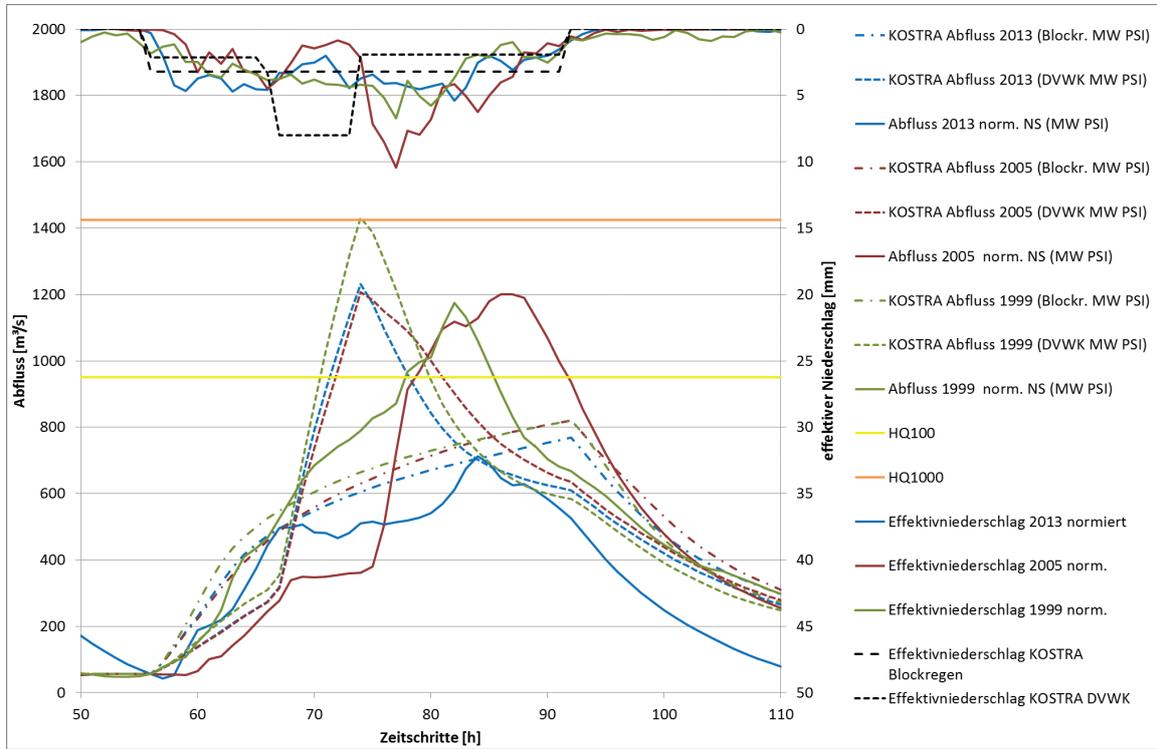


Abbildung 7 a) b) Vergleich der Effektivniederschläge der synthetischen und naturnahen Niederschlagsverläufe, sowie der resultierenden Zuflüsse zum Sylvensteinspeicher mit einem mittleren PSI (MW-PSI) (7a, oben) und dem Ereignis-PSI (7b, unten).
 Effective precipitation of synthetically and standardized sequences in comparison and additional the resulting discharge at Sylvenstein reservoir with different runoff coefficients (mean top / single event bottom).

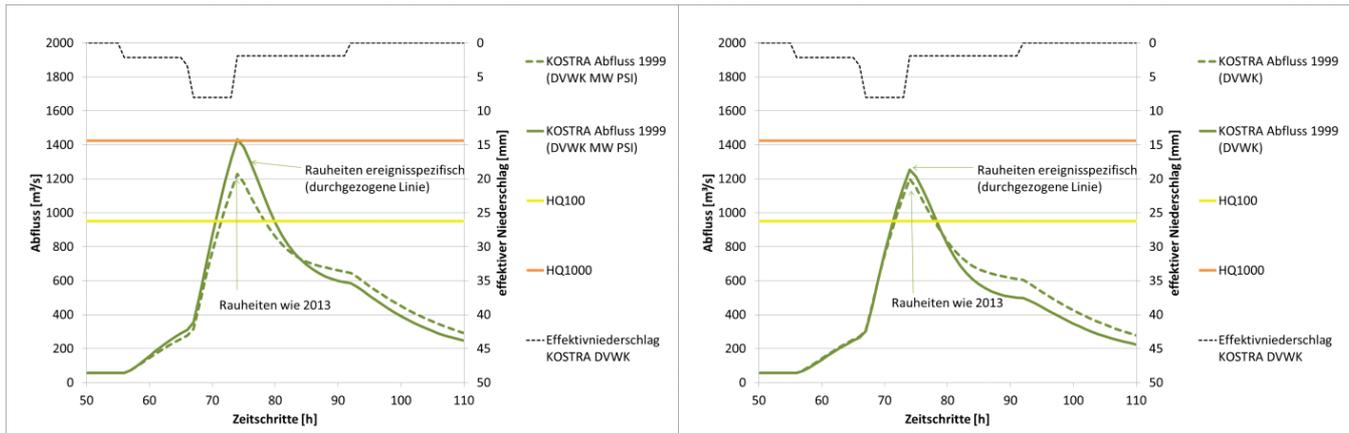


Abbildung 8

Einfluss der Rauheiten des Floodroutings auf die Scheitelberechnung am Beispiel der Berechnungen mit KOSTRA DVWK für den Sylvensteinspeicher: Vergleich der Berechnung mit ereignisspezifischer Rauheit für 1999 und Rauheit wie für das Ereignis 2013 angewendet auf 1999 (MW-PSI links, Ereignis-PSI rechts).

Influence of floodrouting and roughness to calculation of the peak flow with statistical rainfall at the example of Sylvenstein reservoir using mean coefficient (left) and single event coefficient (right) - dotted line roughness coefficient 2013 – line roughness coefficient 1999.

Der niedrigste Scheitel tritt bei den geringsten Stundenintensitäten auf, der höchste bei den höchsten Stundenintensitäten – bei identischer 36 h-Niederschlagssumme. Nachdem alle anderen Ursachen ausgeschlossen wurden, ist diese Kausalität nun eindeutig. Die an die Ereignisse angepassten PSI zeigen zusätzlich den Effekt durch die unterschiedliche Abflussbereitschaft. Bei den Hochwassern 2005 und 2013 lagen relativ hohe PSI vor. Die hohe Abflussbereitschaft von 2005 erzeugt einen sehr hohen Effektivniederschlag mit bis zu 10 mm/h und im daraus resultierenden Abfluss fast das HQ1000, während die Kombination aus gleichmäßigeren Intensitäten und geringer Abflussbereitschaft wie 1999 nur Effektivniederschläge unter 5 mm/h bedingt mit resultierenden Abflüssen knapp im Bereich des HQ100.

Neben der Quantifizierung des Unsicherheitsbereiches erfolgt für die Bewertung der Ergebnisse ein Vergleich mit dem statistischen

HQ100 Wert (Tab. 3). Für die Praxis wird häufig eine Mittelung der Schätzungen aus dem N-A-Modell empfohlen. Mit einem mittleren PSI und mittleren Rauheiten würde man im Mittel aus allen naturnahen Verteilungen einen Scheitel von 990 m³/s schätzen, mit den Ereignis-PSI einen Scheitel von 1080 m³/s. Aus den synthetischen Verteilungen liegen die Schätzungen etwas höher mit 1010 (PSI MW) bis 1115 (Ereignis-PSI) m³/s. Damit liegen alle gemittelten Ergebnisse im erwarteten Bereich des HQ100 +/- 20 % (760 bis 1.140 m³/s) und die verwendeten Verteilungen sind für die Schätzung des HQ100 Scheitels geeignet, mit einer Tendenz der synthetischen Verteilungen zu leicht höheren Werten. Bewertet man die Scheitel noch einzeln, sind die Abweichungen vom HQ100 für alle Varianten der naturnahen Niederschlagsverteilungen jeweils kleiner als 30 %, ebenso die Schätzung aus dem Blockregen. Die Schätzung aus der DVWK-Verteilung mit

Tabelle 3

Vergleich der Scheitelhöhen, Volumen und Effektivniederschläge.
Comparison of peak flow, volume and effective precipitation at Sylvenstein reservoir.

Ereignisdauer 36 h	Original	Ereignis-PSI	PSI MW	KOSTRA Ereignis-PSI			KOSTRA PSI MW		
		NS normiert	NS normiert	Blockregen	DVWK	Mittelwert	Blockregen	DVWK	Mittelwert
Scheitelhöhe 1999	916	1006	1062	770	1199	985	797	1229	1013
Scheitelhöhe 2005	1056	1433	1201	984	1447	1215	820	1208	1014
Scheitelhöhe 2013	595	810	712	904	1385	1144	768	1231	1000
Scheitelhöhe Mittelwert	856	1083	992	886	1344	1115	795	1223	1009
Effektivniederschlag 1999	85	102	115	100	100		116	115	
Effektivniederschlag 2005	100	143	122	137	137		116	115	
Effektivniederschlag 2013	103	143	122	134	134		116	115	
Ereignisdauer 36 h	Original	Ereignis-PSI	PSI MW	KOSTRA Ereignis-PSI			KOSTRA PSI MW		
Volumen in m ³		NS normiert	NS normiert	Blockregen	DVWK	Mittelwert	Blockregen	DVWK	Mittelwert
Volumen 1999*	82,1	99,4	108,3	92,6	91,4	92,0	96,8	96,9	96,9
Volumen 2005*	66,9	119,4	92,6	125,4	122,2	123,8	99,9	98,4	99,1
Volumen 2013*	49,7	71,0	61,1	112,9	111,4	112,1	93,0	91,7	92,4
Volumen MW	66,2	96,6	87,4	110,3	108,3	109,3	96,6	95,7	96,1
*über 350 m ³ /s (MHQ)									
rot > 20 % Abweichung HQ100									

1280 m³/s liegt bereits außerhalb des 30%-Unsicherheitsbandes. Bei den einzelnen Ergebnissen liegen die Schätzungen der Scheitel mit dem Ereignis-PSI häufig näher am HQ100 als mit den mittleren PSI, erzeugen aber mit den Bedingungen von 2005 auch die absoluten Maxima. Das ist daran gekoppelt, dass eine Schätzung aufgrund der Verteilungen mit den höchsten Intensitäten (DVWK, 2005) auch die höchsten Abflüsse liefert. Von allen Einzelergebnissen repräsentieren die Varianten, die aus der naturnahen Verteilung von 1999 hervorgehen, am ehesten einen mittleren Zustand und liegen auch am nächsten zum HQ100. Die Rechnungen mit an das Ereignis angepassten oder mittleren Parametern sind dabei gleich geeignet.

5.2 Vergleich der erzeugten Volumen

Für die Wirkungsanalyse von Rückhalteräumen sind die Scheitel vor allem für die Beurteilung der Scheitelkappung von Bedeutung, d. h. für die Einhaltung von Bemessungsabflüssen im Steuerungsquerschnitt unterhalb. Für die Bemessung des Rückhaltevolumens der Speicher sind die Volumina der erzeugten Ganglinien entscheidend. Die Volumina der Wellen in Tabelle 3 entsprechen aufgrund der Berechnung mit konstanten PSI nicht der mittleren, sondern der maximalen Schätzung. Der Bezug auf die Welle oberhalb von 350 m³/s wurde für die relative Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Hochwasserbereich gewählt, um die Methoden zu bewerten. Der Bedarf an Rückhaltevolumen zum Hochwasserschutz ergibt sich erst aus der Wirkungsanalyse, die eine gezielte Steuerung berücksichtigt und ist nicht dargestellt. Bei den synthetischen Ganglinien sind die Volumina ziemlich ähnlich, obwohl die Scheitel unterschiedlich hoch sind. Die Ereignis-PSI zeigen eine größere Varianz und erzeugen höhere Werte. Mit mittleren Parametern werden 92 bis 100 Mio. m³ für das Hochwasservolumen über 350 m³/s geschätzt. Die Ergebnisse mit den naturnahen Verteilungen schwanken stärker, vor allem nach unten. Die synthetischen Ganglinien erzeugen tendenziell ein höheres Volumen. Die Scheitel korrelieren dabei nicht direkt mit den Volumina. Es empfiehlt sich daher auch bei den Volumina Spannweiten und Mittelwerte aus der Schätzung mit verschiedenen Varianten zu bestimmen.

5.3 Wellenablauf und Vergleich der Ergebnisse

5.3.1 Alpines Einzugsgebiet der Isar bis zum Sylvensteinspeicher

Mit allen Berechnungsvarianten außer mit der Niederschlagsverteilung von 2013 erreichen die Wildbäche Dürrach, Walchen und Rißbach ihre Scheitel zeitlich früher als die Isar (Rißbachdüker und Mittenwald). Bei der Dürrach und der Walchen liegen die Pegel fast direkt an der Mündung, weshalb die Fließzeit für die Wellenüberlagerung am Sylvensteinspeicher vernachlässigt werden kann (Abb. 1). Für den Rißbach ist der Zeitversatz durch die Fließzeit - etwa eine Stunde - ebenfalls gering. Berücksichtigt man zusätzlich die Fließzeit der Isar auf der Fließstrecke bis zum Sylvensteinspeicher, zeigt sich ein noch stärkerer zeitlicher Versatz zu den Wildbächen. Für die Berechnung der theoretischen Fließzeiten in Tabelle 4 ist die Geschwindigkeit (ca. 2 m/s) aus Abflussmessungen am Pegel Rißbachdüker verwendet worden, dort ist der Abfluss baulich gebündelt. Davon abgesehen weist die Isar zwischen Mittenwald und Rißbachdüker noch eine weitgehend unbeeinflusste Wildflusscharakteristik mit großen Überflutungsflächen (Schotterflächen mit im Jahresverlauf unterschiedlichem Bewuchs) auf. Die für Mittenwald bis Sylvensteinspeicher ermittelten theoretischen Fließzeiten sind daher als Minimalzeit ange-

Ereignis	Entfernung Sylvenstein [km]	Theoretisch Fließzeit Sylvenstein [h]	2013*		2005*		1999*		2013 DVWK		2005/1999 Block	
			Scheiteldifferenz zu Sylvenstein [h] inkl. minimale Fließzeit									
Mittenwald	16,4	2,2	3,2	4,2	1,2	0,2	7,2	6,2	4,2	4,2	3,2	3,2
Rißbachdüker	7,4	1,0	6,0	0,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	5,0	4,0	2,0
Rißbach	11,3	1,5	0,5	2,5	-5,5	-5,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Dürrach	0,5	0,1	-0,9	0,1	-7,9	-7,9	-2,9	-3,9	0,1	0,1	0,1	0,1
Walchen	1,0	0,1	-0,9	-0,9	-5,9	-5,9	-3,9	-3,9	0,1	0,1	0,1	0,1

* Werte aus Nachsimulation hergeleitet; wenn vom Pegel nicht erfasst Modellrechnung in LARSIM mit PSI MW, für 1999 mit Ereignis-PSI

setzt. Tabelle 4 dient zur einfachen Vergleichbarkeit der Scheitel für die zeitliche Überlagerung am Sylvensteinspeicher.

Die genaue Überlagerung ergibt sich aus der Berechnung mit dem N-A-Modell. Das N-A-Modell berücksichtigt unterschiedliche Fließzeiten für die jeweiligen Durchflüsse über die Doppeltrapezprofile und Rauheiten, je nach Gerinne und Bewuchs. Bei den synthetischen Ganglinien führen die Unterschiede in der Laufzeit durch an das Ereignis angepasste Rauheiten dazu, dass bei gleicher Niederschlagsverteilung und –summe die Wellenüberlagerung verändert ausfällt. Der Einfluss des Flood-Routings zwischen Mittenwald und Rißbachdüker ist bei der DVWK-Verteilung mit der kurzen hohen Spitze deutlicher zu erkennen als beim Blockregen mit dem lang gezogenen flachen Scheitel. Die Unterschiede im Flood-Routing zwischen 1999 (Faktor Rauheit 1,3) und 2005 (Faktor 0,9) sind beim Blockregen an der Isar aufgrund des flachen Scheitels unter einer Stunde (Ergebnisse daher in der Tabelle zusammengefasst). Zwischen 1999 (Faktor 1,3) und 2013 (Faktor 0,5) ist hingegen die Verzögerung der Welle auf der Fließlänge von den 9 km zwischen Mittenwald und Rißbachdüker so unterschiedlich, dass bei der DVWK-Verteilung eine maximale zeitliche Differenz von 7 h entsteht. Das zeigt welch großen Einfluss die Rauheiten auf dieser Strecke haben können. Bei den naturnahen Verteilungen trägt auch die Höhe der Abflüsse aus

den Zwischengebieten zu den Unterschieden im Zeitpunkt der Überlagerung bei, da auf dieser Strecke nicht nur Wellenablauf, sondern auch Wellenaufbau erfolgt. Diesen Effekt kann man in Tabelle 4 am Pegel Rißbachdüker im Vergleich der Scheitel der beobachteten Ereignisse mit ihren normierten Niederschlägen sehen. Dabei bleibt das Routing jeweils gleich und dennoch ändert sich der Zeitpunkt der Scheitel, da der Wellenaufbau durch die unterschiedlichen Beiträge der Teilgebiete anders erfolgt. Trotz dieser Unterschiede im Wellenaufbau und Wellenablauf zeigen fast alle Varianten, dass die Isar ihren Scheitel am Sylvensteinspeicher meistens später erreicht als die Wildbäche. 2013 und 2005 wirkt die Isar am Sylvensteinspeicher scheinbar bildend, 1999 die Wildbäche. Die Erklärung dafür liefert die genaue Analyse des Wellenablaufes und der Niederschlagsverteilung. Zum Vergleich der naturnahen und der synthetischen Ganglinien ist in Abbildung 9 der Blockregen gemeinsam mit dem normierten Ereignis 2013 dargestellt, da sie von der Niederschlagsverteilung einen ähnlichen Typen repräsentieren. Die DVWK-Verteilung ist in Abbildung 11 zusammengefasst und wird mit den normierten Ereignissen 2005 und 1999 in Abbildung 10 verglichen. Bei den synthetischen Ganglinien ist nur die Variante mit den Flood-Routing-Parametern von 2005 dargestellt, die anderen Varianten können Tabelle 4 entnommen werden.

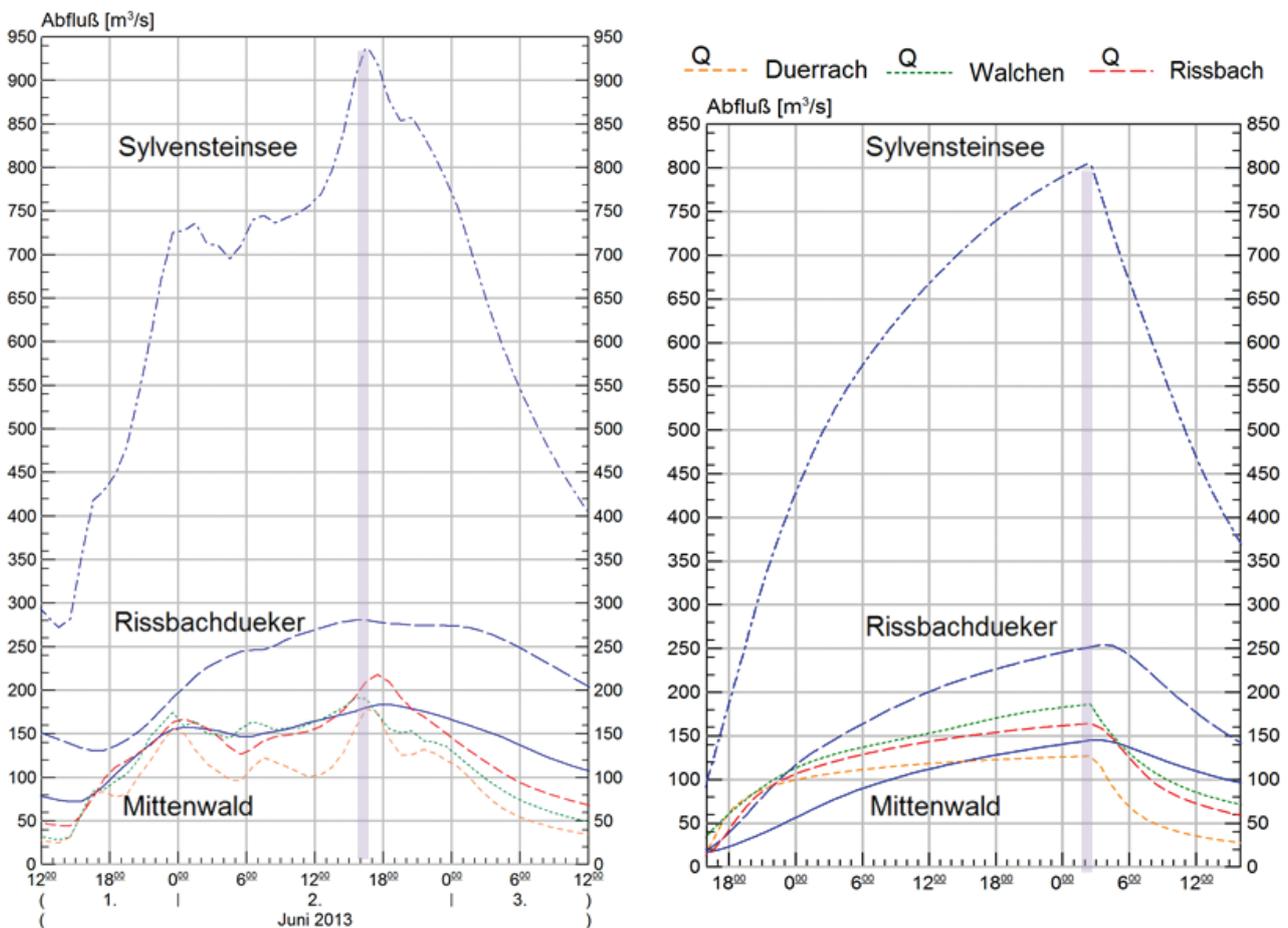


Abbildung 9

Wellenablauf an der Isar bis Sylvensteinspeicher mit Zuflüssen Dürrach, Walchen und Rißbach, Typ Blockregen MW PSI (links 2013 naturnah, rechts Blockregen Parameter wie 2005)

Hydrograph processing at Isar until Sylvenstein reservoir with tributary Dürrach, Walchen and Rißbach. Type uniform with mean runoff coefficient (left standardized 2013, right uniform N100 with parameters from 2005).

Aufgrund der gleichmäßigen Niederschlagsverteilung beim Typ Blockregen zeigen die Wellen an der Isar und den Wildbächen keine ausgeprägten Scheitel und die zeitliche Differenzierung tritt in den Hintergrund, daher ist bei diesem Typ die Tendenz zur Überlagerung größer. Mit der naturnahen Verteilung basierend auf 2013 treffen die Scheitel von Dürrach und Walchen am Sylvensteinspeicher nahezu mit dem der Isar vom Reißbächdücker zusammen und erzeugen eine gemeinsame Zuflussspitze. Zwei bis vier Stunden später treffen die Scheitel von Reißbach und Mittenwald am Speicher ein und verlängern den Scheitelbereich. Beim Blockregen sind die Spitzenabflüsse insgesamt niedriger als bei der naturnahen Verteilung durch die noch gleichmäßigere Niederschlagsverteilung. Zeitlich sind die Scheitel der Wildbäche und der Isar beim Blockregen weiter entzerrt. Der Effekt der unterschiedlichen Niederschlagsverteilung und des Wellenablaufes macht sich zwischen Blockregen (Flood-Routing 2013) und naturnaher Verteilung mit insgesamt 200 m³/s Differenz im geschätzten Scheitel am Sylvensteinspeicher deutlich bemerkbar (150 m³/s mit Flood-Routing von 2005). Durch die insgesamt niedrigeren Scheitel werden aber trotz der stärkeren Überlagerung der Wellen keine kritischen Höhen erreicht.

Bei den ausgeprägten Wellenabläufen aus der naturnahen Verteilung von 2005 und 1999 lagen jeweils etwa 7 h zwischen den Scheiteln der Zuflüsse und der Isar. Bei der Niederschlagsverteilung

2005 hat sich ungünstig ergeben, dass 7 Stunden nach dem höchsten Niederschlag ein zweiter Niederschlagspeak entstanden ist (Abb. 6). Das hat zu einem Wiederanstieg der Zuflüsse geführt, zu dem Zeitpunkt, zu dem die Überlagerung mit der Isarwelle stattfindet. Daher hat sich nach dem Scheitel, der durch die Zuflüsse Walchen, Dürrach und Reißbächklamm aufgebaut wird (Abb. 10 hellblau), ein zweiter höherer Scheitel (Abb. 10, fliegenderfarben) ausgebildet, der sich durch die Scheitelüberlagerung der Isar mit dem zweiten niedrigeren Scheitel der Wildbäche gebildet hat. Durch die Niederschlagsverteilung mit einem Abstand von 7 h zwischen einem Haupt- und einem Nebenpeak wird die Wellenüberlagerung am Sylvensteinspeicher forciert, die ohne Nebenpeak nicht stattgefunden hätte. Die Analyse des Wellenablaufes zeigt damit eine weitere Ursache, warum der Scheitel 2005 auch nach der Normierung der Niederschlagssumme deutlich höher ausfällt als bei den anderen Verteilungen.

Bei der DVWK-Verteilung liegen mit den Bedingungen von 1999 und 2005 im Vergleich zu den naturnahen Verteilungen (7 h), nur 4 h zwischen dem Eintreffen des Scheitels der Isar vom Reißbächdücker und denen der Wildbäche. Diese kürzere Zeitspanne kann die stärkere Überlagerung der Wellen erklären und warum die Ergebnisse mit der DVWK Verteilung für den Sylvensteinspeicher höher ausfallen als mit den naturnahen Verteilungen, bei denen diese Zeitspanne größer ist (Tab. 4).

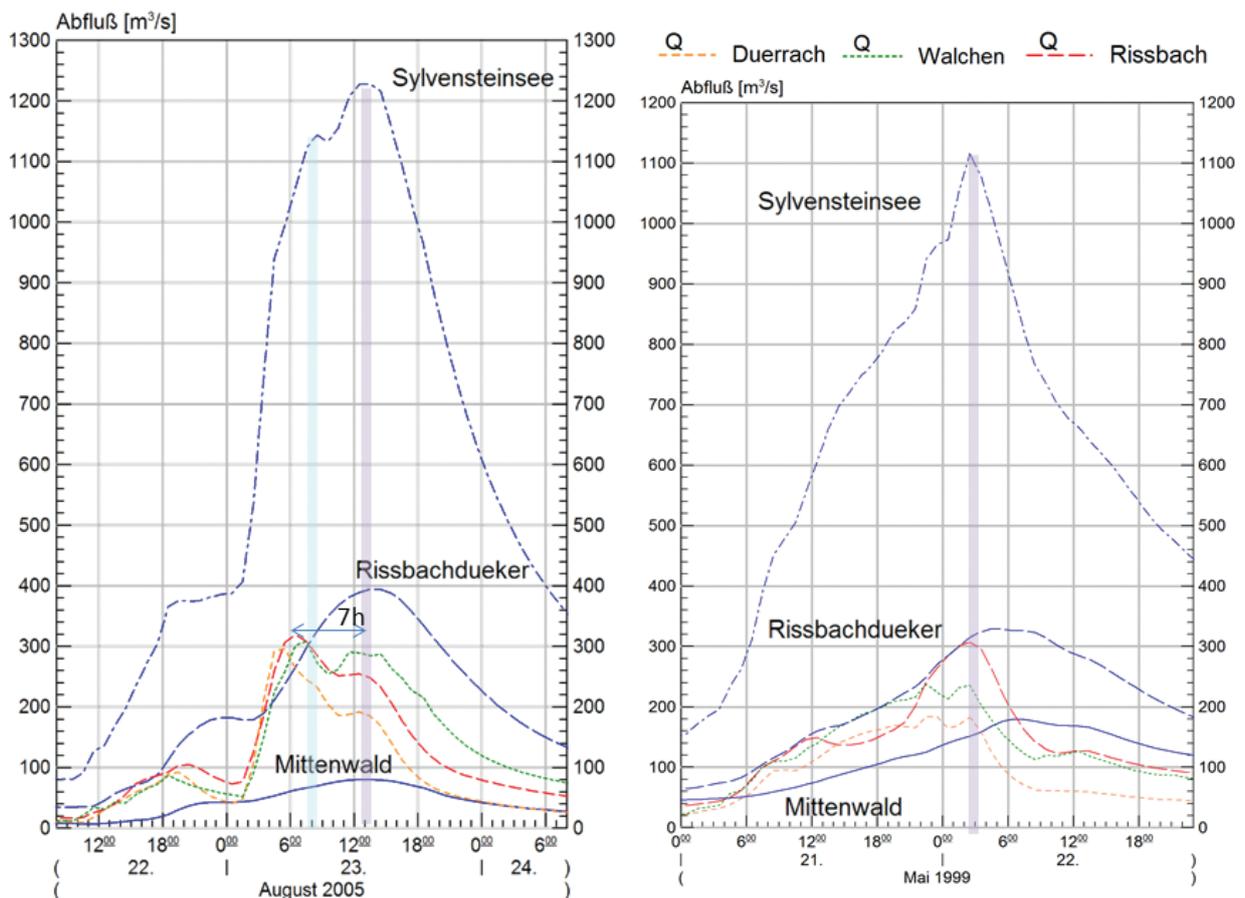


Abbildung 10

Wellenablauf an der Isar bis Sylvenstein mit Dürrach, Walchen und Reißbach Typ Spitzenregen (2005 naturnah PSI MW (li.), 1999 naturnah Ereignis-PSI (re.)). Hydrograph processing at Isar until Sylvenstein reservoir with tributary Dürrach, Walchen and Reißbach (type peak rainfall standardized 2005 with mean runoff coefficient left and standardized 1999 event coefficient right).

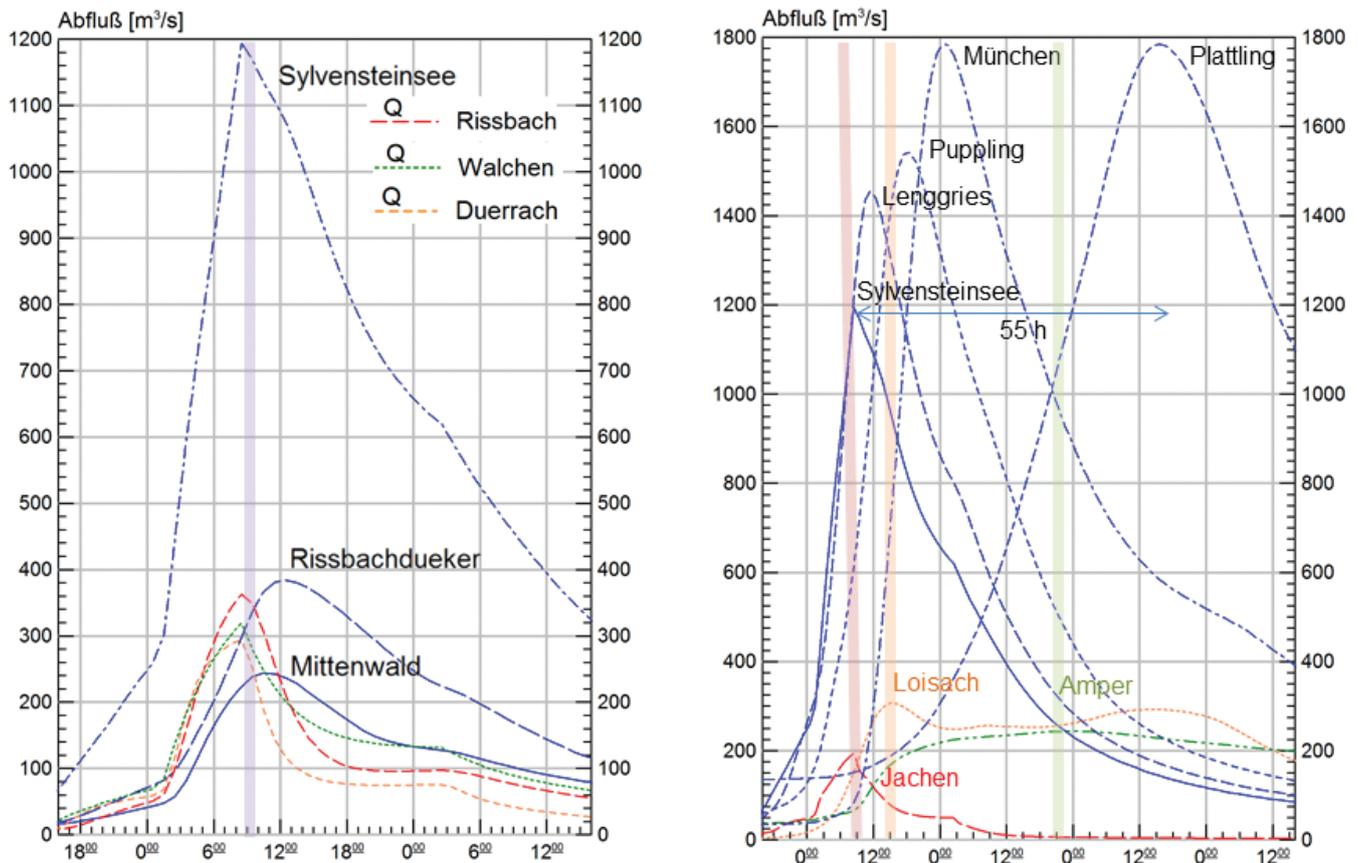


Abbildung 11
 Wellenablauf an der Isar Typ Spitzenregen (beide KOSTRA DVWK), Sylvensteinspeicher mit Dürrach, Walchen und Rißbach (li.), mit Zuflüssen Jachen, Loisach und Amper (re.) (Scheitelbereiche farbig).
 Hydrograph processing at Isar type peak rainfall (both statistical DVWK sequence) until Sylvenstein reservoir with tributary Dürrach, Walchen and Rißbach and right downstream Sylvenstein reservoir with tributary Jachen, Loisach and Amper.

Die Abbildungen 11, 12 und 13 zeigen den Einfluss der unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen für die Isar unterhalb des Sylvensteinspeichers. Die Rauheiten spielen hier eine geringere Rolle, da sie für die Kalibrierung zwischen den Ereignissen kaum variiert werden mussten. Aus den verschiedenen dargestellten Szenarios lassen sich wichtige Merkmale für eine typische Hochwassergenese erkennen. Die Jachen als größter Zufluss zur Isar unterhalb vom Sylvensteinspeicher bis Bad Tölz bildet die maßgebliche Randbedingung für die Scheitelreduktion in Bad Tölz durch die Steuerung am Sylvensteinspeicher. Der Scheitel der Jachen tritt meist kurz vor dem Scheitel des Sylvensteinspeicherzuflusses auf, d. h. Rückhalt am Speicher muss genau dann erfolgen, wenn auch der Zufluss im Scheitelbereich ist. Der nächste große Zufluss ist die Loisach (Abb. 1). Der Scheitel der Loisach aus dem Einzugsgebiet unterhalb des Kochelsees trifft ebenfalls mit der Scheitelwelle der Isar zusammen, bzw. läuft leicht voraus. Nur 2013 gab es eine Niederschlagsverteilung, die den ersten Scheitel der Loisach (Abb. 12, oranger Pfeil) weiter aufgebaut hat und nicht die typische Doppelwelle erzeugt hat, die in den anderen Graphiken zu sehen ist. Ein Rückhalt an der oberen Isar wirkt sich nicht nur auf den Scheitel der Isar in Bad Tölz, sondern durch die Überlagerung des Scheitels der Isar mit dem ersten Scheitel der Loisach an der ganzen Isar positiv aus (STAHL et al., 2016).

Der zweite Scheitel, der durch das Einzugsgebiet oberhalb vom Kochelsee gebildet wird, läuft der natürlichen Isarwelle immer deutlich hinterher. Dies wirkt sich für die natürliche Wellenüberlagerung positiv aus, bedeutet aber für Hochwasserrückhalt mit Fokus auf München und die Isar unterhalb, dass über etwa 50 Stunden mit erhöhten Abflüssen aus der Loisach gerechnet werden muss. Der zweite Scheitel der Loisach und der Scheitel der Amper überlagern sich nicht direkt mit dem Isarscheitel, da sie zeitverzögert auftreten, aber sie begrenzen den Spielraum einer Steuerung im ablaufenden Ast. Die Welle der Ammer wird durch den Ammersee ebenso gedämpft wie der alpine Teil der Loisach im Kochelsee. Für die Isar unterhalb von Loisach und Amper sind daher noch sehr lange erhöhte Abflüsse durch die natürliche Retention in den Seen zu erwarten, wenn die Scheitel der alpinen Zuflüsse längst gefallen sind. Dies spielt auch eine Rolle, wenn das Hochwasserschutzsystem auf die Donauwelle abgestimmt werden soll, deren Scheitel meist in diesen Zeitbereich fällt. Insgesamt zeigen die Abbildungen des Wellenablaufes für die Isar, dass unter verschiedenen Niederschlagsverteilungen zwischen dem Peak der Isar am Sylvensteinspeicher und dem Scheitel in Plattling ohne steuernden Eingriff zwischen 40 und 55 h liegen. Die naturnahen Verteilungen erzeugen einen schnelleren Scheitelaufbau als die synthetischen Verteilungen. 1999 gibt die mittlere Laufzeit am besten wieder.

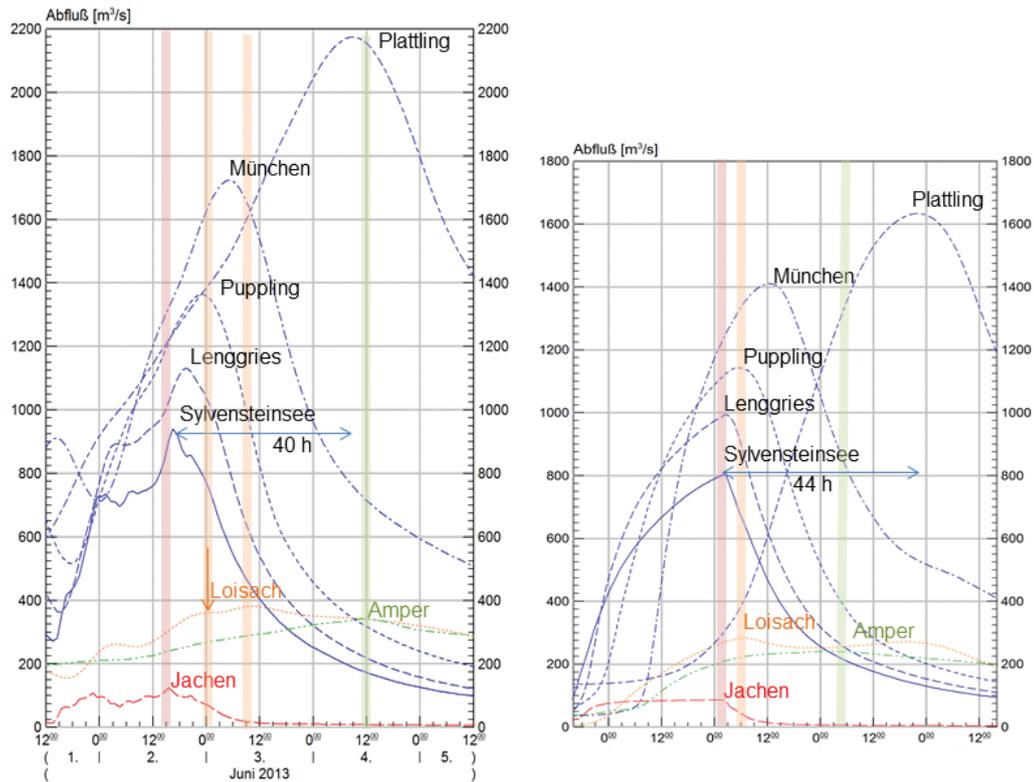


Abbildung 12

Wellenablauf der Isar mit Zuflüssen Jachen, Loisach und Amper (Scheitelbereiche farbig) Typ Blockregen (links naturnah 2013, rechts Blockregen). Hydrograph processing downstream Sylvenstein reservoir at different gauges with tributary Jachen, Loisach and Amper.

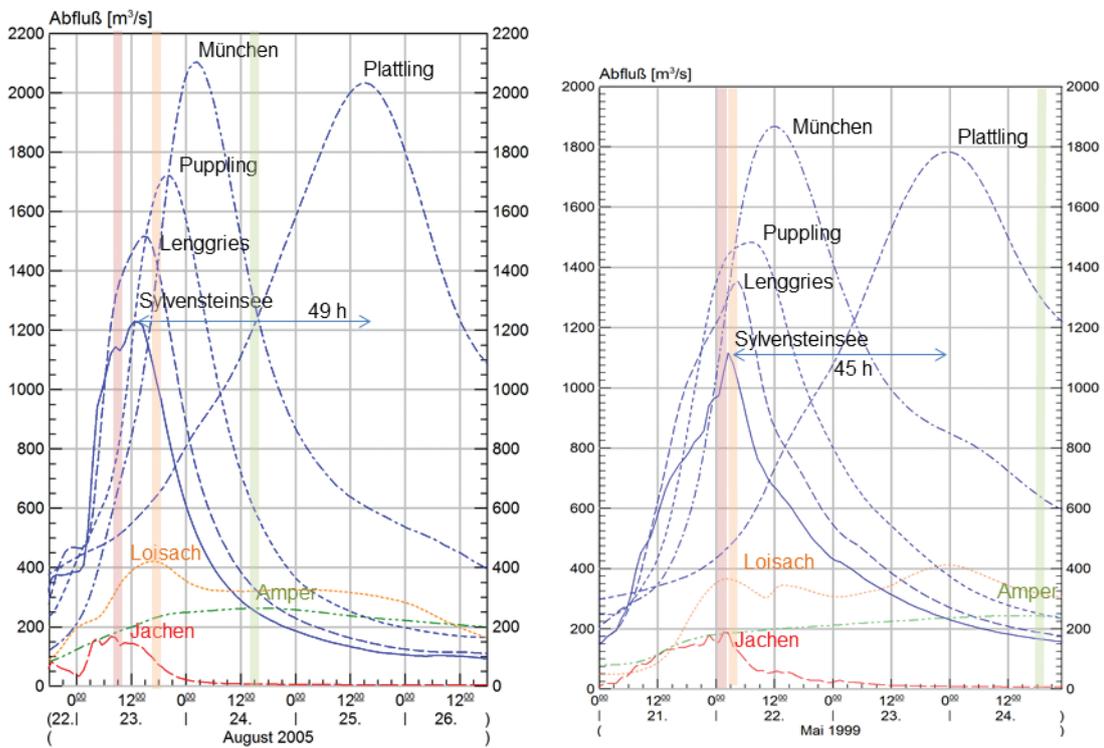


Abbildung 13

Wellenablauf der Isar mit Zuflüssen Jachen, Loisach und Amper (Scheitelbereiche farbig) Typ Spitzenregen (2005 naturnah PSI MW (links), 1999 naturnah Ereignis-PSI (rechts)). Hydrograph processing Isar downstream Sylvenstein reservoir at different gauges with tributary Jachen, Loisach and Amper, type peak rainfall standardized 2005 mean runoff coefficient left, standardized 1999 event runoff coefficient right.

6. Diskussion

Im Isareinzugsgebiet reagieren die Abflussscheitel sehr sensitiv auf zeitliche Unterschiede im Niederschlag, wie sie durch Zugbahn geprägte Niederschläge entstehen. Die zeitliche Differenz zwischen der Überregnung der verschiedenen Teileinzugsgebiete steuert maßgeblich die Wellenüberlagerung und damit die Abflussscheitel. Für die Schätzung der Abflussscheitel ist neben der Niederschlagssumme daher der Niederschlagsverlauf sehr wichtig, um die Spannbreite der natürlichen Variabilität abzubilden. Die Normierung der beobachteten Niederschläge auf die KOSTRA-Summen ist eine alternative Methode standardisierte Niederschlagsverteilungen für die Generierung von Ganglinien zu erzeugen. Diese naturnahen Verteilungen zeigen ein anderes Verhalten als die synthetischen Verteilungen. Die aus den naturnahen Verteilungen abgeleiteten Ganglinien sind zu empfehlen, um den Wellenablauf und die typische Form der Überlagerung wiederzugeben. Dies ist für die Anwendung in der Wirkungsanalyse wichtig, da es einen großen Einfluss auf die Scheitelbildung und die Beurteilung der Wirkung von Hochwasserrückhalteräumen hat. Darüber hinaus ist eine Kombination beider Verfahren hilfreich, um den gesamten Merkmalsraum abzubilden. Aufgrund der kombinierten Analyse abgelaufener Ereignisse und synthetischer Ganglinien kann man typische Merkmale der Hochwassergenese erkennen.

Aus der Ereignisanalyse kann als Charakteristik für die Hochwassergenese am Sylvensteinspeicher festgehalten werden, dass typischerweise aufgrund der Konzentrationszeit und des Niederschlagsverlaufs die Abflüsse der Wildbäche bereits wieder fallen bevor der Isarscheitel eintrifft und es nicht zu einer vollständigen Überlagerung kommt. Bei lang andauerndem Regen gleichmäßiger Intensität findet die Differenzierung der Scheitel nicht so deutlich statt und die Überlagerung ist größer. Durch die niedrigeren Scheitel bleiben die Ergebnisse aber unkritisch. Eine ungünstige zeitliche Niederschlagsverteilung, wie 2005 (Sylvensteinspeicher) oder 2013 (Loisach), erzeugt bei gleicher Niederschlagssumme deutlich höhere Abflüsse. Es wirkt sich nicht nur die maximale Niederschlagsintensität – wie in Kapitel 4.3 gezeigt – verschärfend aus, sondern auch die zeitliche Niederschlagsverteilung im Verhältnis zur Konzentrations- und Fließzeit wie in Kapitel 5.3 dargestellt. Je mehr der Wellenaufbau im Vergleich zum Wellenablauf eine Rolle spielt, desto mehr fallen die Unterschiede durch die verschiedenen Methoden zur Niederschlagsverteilung ins Gewicht. Am wichtigsten ist dieser Unterschied noch bei der Überlagerung mit den Wildbächen (am Speicher und direkt unterhalb des Speichers) und am Zusammenfluss mit der Loisach. Auch die durch den Rückhalt in den natürlichen Seen stark verformten Wellenteile von Loisach und Amper reagieren noch sensitiv auf die zeitlich unterschiedlichen Niederschlagsverläufe. Für den betrachteten Fall kann die Ableitung aus 1999 als repräsentatives Ereignis für eine Wirkungsanalyse empfohlen werden, da sie diese Wellenüberlagerung von den drei betrachteten Ereignissen am besten wiedergibt.

Die Variabilität der Ergebnisse wird zusätzlich zu den beobachteten Niederschlagsverläufen durch die unterschiedlichen PSI erhöht. Diese Erkenntnisse sind nicht neu, können aber für die beobachteten Ereignisse mit der vorgestellten Methode vergleichbar gemacht werden und für die Modellierung mit LARSIM quantifiziert und bewertet werden. Die Ergebnisse zeigen auch, wie sensitiv das Modell LARSIM auf Veränderungen in den wenigen variabel gehaltenen Parametern bzw. auf den Niederschlag in unter-

schiedlicher zeitlicher Verteilung trotz gleichbleibender Summe reagiert.

Insgesamt werden mit allen naturnahen Niederschlägen und mittleren Parametern gute Szenario-Ereignisse erzeugt. Es ist auch möglich, aus den verschiedenen naturnahen Verteilungen eine auszuwählen, die einem mittleren Verhalten in der Scheitelbildung entspricht und repräsentativ im Wellenablauf ist. Die ausschließliche Betrachtung der synthetischen Verteilungen mit einem mittleren Parametersatz ist nicht geeignet, die natürliche Variabilität wiederzugeben, vor allem bei den Volumina. Dennoch konnte gezeigt werden, dass auch bei der Verwendung von mindestens zwei synthetischen Niederschlagsverteilungen, die die unterschiedlichen Niederschlagstypen (DVVK und Blockregen) wiedergeben, eine ausreichende, wenn auch nicht so gute Grundlage gegeben ist, um die Speicherwirkung zu beurteilen. Durch gute Kenntnis der Hochwassergenese, d. h. umfangreiche Voranalysen wie für den Sylvensteinspeicher durchgeführt, kann man die Auswahl einer repräsentativen Ganglinie verbessern. Für den konkreten untersuchten Fall wurde in Folge der Voruntersuchungen das naturnahe Ereignis 1999 - trotz eher hoher Volumen - verwendet, um ein naturnahes Szenario für die Wirkungsanalyse abzuleiten, da es das mittlere Verhalten bei Scheitelhöhe und Wellenablauf besonders gut wiedergibt.

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen die Bedeutung des Niederschlagsverlaufes für die Hochwasserbildung auf. Die Grundgesamtheit der vorgestellten Ereignisse und Niederschlagsstationen reicht jedoch nicht aus, um allgemeingültige Empfehlungen für die Niederschlagsverteilung für hohe Dauerstufen abzuleiten. Die Bedeutung dieser Zusammenhänge für den Sylvensteinspeicher und die Isar zeigt aber den Bedarf weiterer systematischer Untersuchungen des Niederschlagsverlaufes auf. Dabei könnte auch geprüft werden, ob für durch Zugbahn geprägte Niederschläge die Verwendung von Abminderungsfaktoren der KOSTRA Werte abgeleitet werden kann.

Die Berechnungen haben darüber hinaus gezeigt, dass auch die Wahl des Flood-Routings von Bedeutung ist und die Gültigkeit der PSI Kalibrierung eng an die für die Kalibrierung gewählten Parameter des Flood-Routings gebunden ist. Eine grundsätzliche Empfehlung für die Bestimmung des PSI kann nicht abgeleitet werden. Ein mittlerer Parametersatz von PSI und den Rauheiten ist für die Schätzung des HQ100 nicht grundsätzlich besser geeignet als ein an Einzelereignissen kalibrierter Parametersatz. Durch die Kalibrierung an Einzelereignisse kann die Unsicherheit der Ergebnisse verringert werden. Die Kalibrierung an die beobachteten Ereignisse hat aber nicht wie erwartet zu signifikanten Verbesserungen der Ergebnisse geführt, wenn mit naturnahen Niederschlägen gearbeitet wird. Dies hängt mit der Abhängigkeit des Abflussbeiwertes von der Niederschlagssumme zusammen, die nach der Kalibrierung durch die Normierung verändert wurde, aber auch an den anderen Unsicherheiten in der Modellbeschreibung, die durch die Kalibrierung ausgeglichen werden (BLÖSCHL, 2005). Nach der Normierung des Niederschlages kann sich der Vorteil der Kalibrierung an Einzelereignisse daher relativieren oder sogar ins Gegenteil umkehren. Ein mittlerer Parametersatz neigt weniger zu besonders hohen oder niedrigen Ergebnissen. Insgesamt scheint es unter dem Aspekt der Normierung der Niederschläge trotz einzelner besserer Ergebnisse mit den individuellen Parametern empfehlenswert, die Parameter über mehrere Hochwasser zu mitteln und keine individuelle

Kalibrierung durchzuführen, außer um den Unsicherheitsbereich abzubilden. Unabhängig von der eingesetzten Methode zum Niederschlagsverlauf zeigen die Ergebnisse recht deutlich, dass für die Modellierung und vor allem die Schätzung von Bemessungswerten, der Aspekt der Abflussbildung durch den Abflussbeiwert weiter vertieft werden müsste. Durch die Interaktion der Rauheiten mit den PSI ist eine Übertragbarkeit bei gleichzeitiger Kalibrierung beider Parameter aus Einzelereignissen auf andere Ereignisse nicht unbedingt gegeben und sollte genau geprüft werden. Dieses Problem kann umgangen werden, wenn konstante Translationsparameter verwendet werden, um Laufzeitunterschiede auszugleichen anstelle der Anpassung der Rauheiten, die wie PSI durch die Retention auch auf die Scheitelhöhe wirken. Dafür wurden inzwischen Anpassungen in LARSIM vorgenommen, die dies nun ermöglichen.

Die Scheitelschätzung des HQ100 von Ganglinien aus naturnahen Niederschlagsverteilungen hat im Mittel bessere Ergebnisse erzielt als aus synthetischen Niederschlagsverteilungen. Der Vergleich mit der Statistik zeigt, dass im Mittel mit allen Methoden Scheitelwerte berechnet werden, die plausibel sind, auch wenn einzelne Berechnungen mehr als 30 % vom HQ100 abweichen können und kritisch zu sehen sind. Für die Schätzung von Bemessungswerten ist daher immer ein Mittelwert aus verschiedenen Niederschlagsverteilungen sinnvoll. Zusätzlich zum Scheitelwert sollten die Volumina betrachtet werden. Über den Vergleich mit dem HQ100 der Pegelstatistik ist es jedoch noch nicht möglich für das Beispiel zu zeigen, dass die naturnahen Verteilungen ein besseres Schätzergebnis liefern als die synthetischen, auch wenn der Mittelwert der naturnahen Verteilungen rechnerisch näher am HQ100 der Pegelstatistik liegt. Dies zeigt sich aber bei der Analyse des Wellenablaufes.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Natur zeigt ein weites Spektrum an Ausprägungen von Hochwasserganglinien. Die Generierung von Hochwasserganglinien zur Optimierung des Hochwasserschutzes gekoppelter Rückhalteräume eines größeren Einzugsgebietes ist daher eine äußerst komplexe Anforderung. Soll ein gesteuerter Rückhalt optimal zur Kappung der Welle unterhalb eingesetzt werden, müssen die Genese und der Wellenablauf des Hochwassers ober- und unterhalb genau erfasst werden. Zur Beurteilung der Rückhaltewirkung müssen Berechnungen mit Abflussganglinien angewendet werden, um Rückschlüsse auf das benötigte Volumen und die Wellenüberlagerung zu erlauben. Mit den vorgestellten Berechnungen zur Generierung von Ganglinien und zur Analyse der Scheitelbildung und des Wellenablaufes sowie der Wellenüberlagerung kann man Merkmalsmuster erkennen, die wichtige Hinweise geben, wie überregionaler Hochwasserschutz geplant werden kann. Die Ganglinien können mit dieser Methode unabhängig von der Pegelstatistik erzeugt werden.

Zusammenfassend kann die Methodik zur Generierung der Abflussganglinien folgendermaßen beschrieben werden: Für die Berechnung wird LARSIM als N-A-Modell verwendet, das die Gebietseigenschaften als Teileinzugsgebietsmodell berücksichtigt. Als Eingangsdaten werden die Niederschlagssummen des N100 (KOSTRA 2000 Dauerstufe 36 h) verwendet, die der charakteristischen Hochwasser-Niederschlagsdauer in Mitteleuropa entsprechen. Die Niederschlagsverteilung über die Zeit folgt den Standardverteilungen für synthetische Bemessungsniederschläge (Blockregen und DVWK-Verteilung) und den bereits beobach-

teten zeitlichen Verteilungen bei abgelaufenen Hochwasserereignissen (naturnahe Verteilung). Die naturnahe Verteilung wird als alternatives Verfahren vorgestellt, das sich durch die zeitliche Niederschlagsverteilung näher an der Genese des Hochwassers durch Zugbahn geprägte Niederschläge in der spezifischen Region orientiert, aber in der Niederschlagsgebietssumme dem N100 entspricht und damit statistisch vergleichbar ist. Die konstanten Abflussbeiwerte sind an die Beobachtungen abgelaufener Hochwasserereignisse kalibriert worden.

Alle vorgestellten Methoden mit LARSIM sind prinzipiell geeignet, typische Hochwasserganglinien zu generieren. Sowohl die Scheitelhöhe als auch das Volumen und der Wellenablauf werden im Mittel gut getroffen. Einzelne Ergebnisse können dabei jedoch stark abweichen. Deshalb ist es wichtig, den Unsicherheitsbereich durch mehrere Berechnungen abzudecken. Auf Grund der großen Variabilität der Ergebnisse ist das Verständnis der Genese des Hochwassers wichtig, um die Zufälligkeit der Ergebnisse zu verringern und ein repräsentatives Szenario auszuwählen. Die Auswertungen zeigen auch, dass neben der Niederschlagssumme und der Abflussbereitschaft des Gebietes der Niederschlagsverlauf im Verhältnis zur Konzentrationszeit der Abflüsse im Gebiet einen starken Einfluss hat. Dies ist bisher durch die typischen synthetischen Niederschlagsverläufe nur unzureichend wiedergegeben.

Die neu vorgestellte Methode naturnahe Ganglinien aus normierten beobachteten Niederschlägen abzuleiten, hat für die Isar bessere Ergebnisse erzielt. Die Auswertungen des Wellenablaufes bestätigen im Bereich Sylvensteinspeicher, dass mit den synthetischen Verteilungen systematisch höhere Ergebnisse berechnet werden, da der zeitliche Versatz des Niederschlages im Nordstau der Berge durch die Zugbahn von Nord nach Süd nicht berücksichtigt wird. Der Effekt des Niederschlagsverlaufes kann auch bis zur unteren Isar nicht vernachlässigt werden. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass mit der naturnahen Verteilung der Niederschläge die Hochwassergenese besser beschrieben wird.

Es wurde also gezeigt, dass diese Methode eine gute Alternative zur etablierten Verwendung synthetischer Niederschlagsverläufe darstellt. Sie bietet Vorteile für die praktische Durchführung der Berechnungen und gibt den Wellenablauf und die Wellenüberlagerung repräsentativer wieder als die synthetischen Verläufe. Sie ist empfehlenswert für alpine und voralpine Gebiete mit ausgeprägten Wellen und einem typischen zeitlichen Versatz durch Strömungsmuster in den Ereignisniederschlägen. Auch für andere Einzugsgebiete mit typischen zeitlichen Niederschlagsmustern ist zu erwarten, dass diese Methode Vorteile gegenüber den synthetischen Niederschlagsverteilungen bietet. Daher sollte sie zumindest als weitere Variante neben den DVWK-Verteilungen mitberechnet werden.

Unabhängig davon wäre eine systematische regionale Auswertung der Niederschlagsverteilungen bei hohen Dauerstufen wünschenswert, um die Methoden der Bemessung auch ohne die vorangestellte Auswertung von Einzelereignissen zu verbessern. Die umfangreichen Re-analysen und Modellberechnungen der Vergangenheit mit Klimamodellen und Radardaten können die Datengrundlage dieser selten beobachteten Ereignisse künftig so verdichten, dass ähnlich wie bei den kurzen Dauerstufen (LUMASSEGER et al., 2016) auch für die längeren Dauerstufen allgemein gültige Erkenntnisse abgeleitet werden könnten, um den vorgestellten Ansatz weiter zu entwickeln. Neben dem Niederschlagsverlauf und den maximalen Intensitäten innerhalb des Verlaufes, ist auch der zeitliche Versatz des Niederschlages in

den Einzugsgebieten dabei eine relevante Information, die abgeleitet werden sollte. Dies entspricht auch der Datengrundlage, die benötigt wird, um belastbare Niederschlagsgeneratoren im dynamischen Alpenraum aufzustellen, die auch für größere Einzugsgebiete und seltene Ereignisse einsetzbar sind.

Insgesamt zeigt die Untersuchung auch, wie sensitiv die Abflussganglinienberechnung in LARSIM auf Veränderungen im Flood-Routing, der Abflussbereitschaft und der räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilung reagiert. Diese Erkenntnisse zu der Sensitivität des Modells LARSIM sind auch auf Berechnungen mit LARSIM in anderen Flussgebieten übertragbar. LARSIM liegt in Bayern flächendeckend für die Hochwasservorhersage vor (BARBEN, 2001). Die Frage, welchen Einfluss das gewählte Flood-Routing Verfahren auf die Simulation hat, ist auch für die Hochwasservorhersage relevant. Mit der Weiterentwicklung der LARSIM Modelle könnten inzwischen für verschiedene Flussabschnitte unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden, um die Modellierung und damit die Hochwasservorhersage zu verbessern (STAHL, 2016). Die Ergebnisse dieser Studie zeigen auch, dass das gewählte Flood-Routing die Bemessungsergebnisse stark beeinflusst. Auf diesen Aspekt sollte vor allem in den alpinen Bereichen ein stärkerer Fokus bei der Schätzung von Bemessungswerten gelegt werden als in Bayern bisher üblich. Auch dazu sind derzeit Arbeiten geplant, die sich mit der Abflussbildung und den Fließwegen in kleinen Einzugsgebieten beschäftigen. Eine Verbesserung der Vorhersagemodelle im Wildbachbereich mit den EGAR Daten soll ebenfalls geprüft werden. Es wäre insgesamt wünschenswert, die Modelle für die Hochwasservorhersage und die Methoden zur Ermittlung von Bemessungswerten in Bayern näher zusammenzubringen. Viele Problemstellungen sind ähnlich, wie in diesem Artikel gezeigt werden konnte. Das vorgestellte Verfahren für die Eingangsniederschläge ist auch im Wasserhaushaltsmodus nutzbar oder für andere N-A-Modelle. Beim Wasserhaushaltsmodell ist das zusätzlich zu lösende Problem für die Ermittlung von Bemessungswerten die Definition der Anfangsbedingungen des Wasserhaushaltes. Wie sich die Anfangsbedingungen auf die Schätzung von Abflüssen aus dem N100 auswirken, muss durch umfangreiche systematische Analysen untersucht werden, um eine Empfehlung zu geben. Erste Untersuchungen in diese Richtung sind für das Maineneinzugsgebiet geplant. Außerdem sind auch Langzeitsimulationen des Wasserhaushaltes in Verbindung mit Klimamodellen in Diskussion, um zu ermitteln, auf welche Vorbedingungen hochwasserrelevante Wetterlagen statistisch gesehen treffen können.

Es gilt auch zu überprüfen, wie die inzwischen vorliegenden Ergebnisse aus der Forschung zu den Abflussprozessen hilfreich sein können, um Bemessungswerte zu schätzen. Entsprechende Abflussprozesskarten liegen derzeit bereits für Rheinland-Pfalz vor und werden in der Praxis für die Wasserhaushaltsmodellierung mit LARSIM genutzt (HAAG et al., 2015). In LARSIM sind die wichtigsten Strukturen bereits geschaffen, um Vorhersage und Bemessung, bzw. Praxis und Forschung wieder näher zusammen zu bringen. Die vorliegende Arbeit kann dafür wichtige Impulse geben.

Bis die Weiterentwicklungen in der Forschung und die Analysen der vergangenen Niederschläge neue Methoden für die Praxis ableiten lassen, bietet die vorgestellte Berechnungsvariante eine gute Ergänzung, um die Resilienz von Hochwasserplanungen in Bezug auf die Unsicherheit der Berechnungsergebnisse zu erhöhen.

Summary

In nature you will find a huge variety of hydrographs. For this generating representative hydrographs for optimized flood protection of interacting reservoirs is a tough requirement. Especially for optimal peak reduction via regulated reservoirs you need to be aware of typical flood generation and hydrograph processing upstream and downstream. For assessment of the storage impact you need hydrographs to calculate the stored volume and the interaction between the hydrographs. With the presented method to generate hydrographs and analyze hydrograph processing and overlapping you can improve the knowledge for planning supra-regional flood protecting systems. This method can be used autonomous of peak flow statistics.

The method of generating hydrographs can be summarized like this: For calculation LARSIM as a rainfall-runoff model is used, characterizing the area by distributing catchments. The statistical rainfall sum for 36 hours (N100 KOSTRA 2000) represents the typical flood precipitation in Middle Europe. For rainfall sequence the new method of standardized sequences derived from observed flood events linked with the statistical sum N100 complete the common practice with synthetically sequences (uniform and DVWK). The standardized sequences are recommended, because they represent more efficient flood generation in case of tracking rainfall. Runoff coefficients are calibrated with observed flood events. It is discussed if single event or mean coefficients are more appropriate to estimate floods. But therefore it could not be found a recommended best practice because of the strong interacting with the flood routing. All discussed methods using LARSIM are appropriate to generate typical flood hydrographs with a mean flood peak flow, volume and hydrograph processing. Nevertheless single results can spread widely. For this ensemble calculations are important to cope with the uncertainty. Additional knowledge about the typical flood generation can help as well to decrease the random of the result and to peak out of the ensemble one representative scenario. Beside the distribution of the rainfall sum and the runoff characteristics of the area the rainfall sequence in dependency of the concentration time of the catchment is an important parameter, which shapes the hydrograph. Synthetically rainfall sequences consider this insufficient. That the new method is superior could be shown in this paper for the catchment of Isar. With the synthetically time distribution the discharge peaks at Sylvenstein reservoir are estimated systematically to high. With the synthetically sequences the time difference in precipitation due to the choked flow at the northern barrier of the alps in case of characteristic north to south tracking rainfall is missing. The effect of the tracking is not only important for the alpine hydrographs but also for downstream. The conclusion is that observed data standardized using statistical rainfall sums describe flood generation more appropriate and are a good alternative to common practice of synthetically time distributions. The method is adapted for easy application to practice. The method is recommended for alpine and pre-alpine catchments with characteristically time differences in rainfall distribution. Furthermore this method is supposed to have generally advantages in all catchments with strong time sequences in rainfall.

These results give a hint, that a new systematically regional statistic of rainfall sequences for long term precipitation would be helpful to improve statistical dimensioning of flood peaks in general. Re-analysis and calculations using climate models and radar data could increase the amount of available data of these rare rainfall

events in a way, that new statistics for long term precipitations could enhance the suggested methods like already shown for short terms (LUMASSEGER et al., 2016). Beside the time sequences with description of rainfall peaks in this time series, the time difference in occurrence between neighbor catchments should be derived. This data base is also needed to develop rainfall generators for extremely dynamic regions like the Alps, in order to be suitable for bigger catchments and rare events.

Recapitulatory the paper shows also, that hydrograph simulation with LARSIM depends sensitively on flood routing, runoff coefficient, and rainfall distribution in time and space. This awareness can be transferred to calculations with LARSIM in other catchments. This is also relevant for flood forecast as LARSIM is used for the flood forecast (BARBEN, 2001). The recent development of LARSIM enables now the use of different flood routing methods for different parts of the river within one model run to improve the simulation and therefor the forecast (STAHL, 2016).

The results of this paper show, that the flood routing affects strongly the dimension of the statistical flood. This aspect should be considered more in common practice. Some investigations for runoff processes in small catchments are projected. In total it would be desirable in Bavaria to bring closer together simulations for operational flood forecast and statistically dimensioning because the problems with model set up are comparable. With water balance models calculating statistical floods there is even one more question to solve concerning the initial conditions. To get a statistically relationship between preconditions and flood relevant rainfall the mentioned long term simulations with climate models are in discussion.

One further way in research to describe runoff is the use of maps characterizing the runoff processes instead of using coefficients. In Rheinland-Pfalz runoff process maps are already used with the water balance model LARSIM (HAAG et al., 2015). Deductive in LARSIM exists already the opportunity to converge forecast and statistical calculations, respectively research and practice. This paper can give some impulse for a further development. Until research and analysis of rainfall events provide new methods for practice, the presented method is an additional variant to improve the resilience of flood protection measurements against uncertainties in the results of calculations for dimensioning.

Anschriften der Verfasser

Natalie Stahl
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
Abteilung 5 – Wasserwirtschaft und Bodenschutz
Ref. 54 b Monitoring, Wasserhaushalt und Warndienste
Rosenkavalierplatz 2
81925 München
Natalie.stahl@stmuv.bayern.de

Prof. Dr. Markus Casper
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Casper
Universität Trier
Physische Geographie
Fachbereich 6 (Raum- und Umweltwissenschaften)
Campus II
D-54286 Trier
casper@uni-trier.de

Literaturverzeichnis

- ANTONETTI, M., SCHERRER, S., KIENZLER, P., MARGRETH, M., ZAPPA, M. (2016): Überprüfung eines prozessnahen Abflussbildungsmoduls auf der Hangskale und in klein- und mesoskaligen Gebieten, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 36.16
- BARBEN, M., et al. (2001): Übersicht über die Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. Bericht Nr. I-19 der KHR, KHR Leylstad 2001. S. 145 ff.
- BARGAOUI, Z., BÁRDOSSY, A. (2015): Modelling short duration extreme precipitation patterns using copula and generalized maximum pseudolikelihood estimation with censoring. *Advances in Water Resources* 84 (2015) 113
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM F. UMWELT U. VERBRAUCHERSCHUTZ (STMUV) (2014): Hochwasserschutz Aktionsprogramm 2020plus. Bayerns Schutzstrategie – Ausweiten • Intensivieren • Beschleunigen, München.
- BINDER, W. (2001): Flusslandschaft Isar : von der Landesgrenze bis Landshut ; Leitbilder, Entwicklungsziele, Maßnahmenhinweise, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, S28 ff.
LFW: Flusslandschaft Isar von der Landesgrenze bis Landshut. München: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 2. Auflage, 2002.
- BLÖSCHL, G. (2005): Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments.- In : Anderson, M. G.: Encyclopedia of Hydrological Sciences. _ J. Wiley, Clchester, pp. 2061-2080
- BÖHM, R., AUER, I., SCHÖNER, W., GANEKIND, M., GRUBER, C., JURKOVIC, A., ORLIK, A., UNGERSBÖCK, M. (2009): Eine neue Website mit instrumentellen Qualitätsklimadaten für den Großraum Alpen zurück bis 1760. In: Wiener Mitteilungen Band 216: Hochwässer: Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage. Hrsg. G. Blöschl, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien.
- BREMICKER, M., BRAHMER, G., DEMUTH, N., HOLLE, F.-K., HAAG, I. (2013): Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und weitere Anwendungen; Korrespondenz Wasserwirtschaft, 6. Jg., H. 9, Seite 509-514.
- CASPER, M. C., GRONZ, O., GEMMAR, P. (2015): Prozesstreu Parametrisierung und Kalibrierung eines Wasserhaushaltsmodells, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 59(4), Seite 136-144.
- CROCHEMORE, L., C. PERRIN, V. ANDRÉASSIAN, U. EHRET, S. P. SEIBERT, S. GRIMALDI, H. GUPTA AND J.-E. PATUREL (2014): Comparing expert judgement and numerical criteria for hydrograph evaluation. *Hydrological Sciences Journal* 60 (3), 402-423, 10.1080/02626667.2014.903331.
- DIN 19700 (2004): Stauanlagen – Teil 11: Talsperren. Juli 2004
- DVWK (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II: Synthese, DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, 113, Verlag Paul Parey.
- DVWK (1991): Starkniederschläge in der Bundesrepublik Deutschland, Erläuterungen und Ergänzungen zu KOSTRA.-In Schriften 97, Verlag Paul Parey Hamburg und Berlin. S. 136-141.
- DVWK (1999b): Einsatz von Niederschlags-Abfluss-Modellen zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen. In: Hochwasserabflüsse. Schriftenreihe des DVWK 124, Bonn.
- DWA (2012): Merkblatt DWA-M 552 Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- EBNER VON ESCHENBACH, A. D., HABERLANDT, U., BUCHWALD, I., BELLI, A. (2008): Ermittlung von Bemessungsabflüssen mit N-A-Modellierung und synthetischem Niederschlag Wasserwirtschaft, 11: 19-23.

- GÖTZINGER, J., BÁRDOSSY, A., SEIDEL, J., BÁLINT, G. (2008): Untersuchung simultaner Hochwasserereignisse an mehreren Pegeln, Haberlandt, U. [Hrsg.] Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung: Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden; Beiträge zum Tag der Hydrologie, Hannover, 27.-28.März 2008 Hennef: DWA, 2008 (Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; H.23.08)
- HAAG, I., LUCE, A., HENN, N., DEMUTH, N. (2015): Berücksichtigung räumlich differenzierter Abflussprozeßkarten im Wasserhaushaltsmodell LARSIM, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 36.16
- HUBER, R. (2007): Untersuchung des Retentionspotentials im Loisach-Einzugsgebiet. Machbarkeitsstudie zu Modul 1. München: Technische Universität München.
- HOFSTÄTTER, M., CHIMANI, B. (2012): Van Bebbler's cyclone tracks at 700 hPa in the Eastern Alps for 1961-2002 and their comparison to Circulation Type Classifications, Meteorologische Zeitschrift Vol. 21 No. 5 (2012), p. 459 - 473
- HOFFSTÄDTER, M., et al. (2015): WETRAX (Weather Patterns, Cyclone TRacks and related precipitation Extremes), Geographica Augustana Band 19, Universität Augsburg, 2015.
- HOLLE F.-K., LAURENT, S. (2014): Festlegung von Bemessungswerten unterhalb gesteuerter Speicher am Beispiel des Lechs In: „Hochwasser und kein Ende – Statusberichte, aktuelle Vorhaben, neue Planungswerkzeuge“. Beiträge zur Fachtagung am 3. und 4. Juli 2014 in Obernach. pp. 145-158. ISBN 978-3-943683-06-6.
- HRACHOWITZ, M., SAVENIJE, H. H. G., BLÖSCHL, G., MCDONNELL, J. J., SIVAPALAN, M., POMEROY, J. W., ARHEIMER, B., BLUME, T., CLARK, M. P., EHRET, U., FENICIA, F., FREER, J. E., GELFAN, A., GUPTA, H. V., HUGHES, D. A. R., HUT, W., MONTANARI, A., PANDE, S., TETZLAFF, D., TROCH, P. A., UHLENBROOK, S., WAGENER, T., WINSEMIUS, H. C., WOODS, R. A., ZEHE, E., CUDENNEC, C. (2013): A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB) - a review. Hydrological Sciences Journal, 1-58, 10.1080/02626667.2013.803183
- KIRNBAUER, R. (2009): Hochwasserauslösende Prozesse. In: Hochwasser: Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage Wiener Mitteilungen Band 216. Hrsg. BLÖSCHL, G. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien
- KOHL, B., STEPANEK, L., (2005): ZEMOKOST - neues Programm für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen. BFW-Praxisinformation, Heft 8
- KOHL, B. (2009): ZEMOKOST- das neue Hydrologie-Programm des BfW. Newsletter des Institutes für Naturgefahren und Waldgrenzregionen des BfW, Innsbruck: bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=8213.10.12.09
- KOHL, B., et al. (2016): Profilsprache, Kartierung, Regensimulation – Erkennen, Abbilden und Validieren der räumlichen Heterogenität von Abflussprozessen. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 36.16
- LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (LFW) (2003): Hochwasser Mai 1999, Gewässerkundliche Beschreibung. – Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München (online Ausgabe)
- LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU) (2007): Gewässerkundlicher Bericht Hochwasser August 2005. - Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg (online Ausgabe).
- LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU) (2011): Flusslandschaft Isar im Wandel der Zeit. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU) (2012): Loseblattsammlung „Hydrologische Planungsgrundlagen“ 3 Hochwasser, S. 22 ff. (nicht veröffentlicht)
- LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU) (2014): EGAR - Kartierung - Erläuterungen und Beschreibung der Vegetations- bzw. Hydrotop-Typen in Wildbacheinzugsgebieten, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.
- LUBW (2016): Leitfaden „Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg“, Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Karlsruhe.
- LUDWIG, K. (1979): Das Programmsystem FGMOD zur Berechnung von Hochwasser-Abflussvorgängen in Flussgebieten. Wasserwirtschaft 69 (1979), 226-228.
- LUMASSEGGER, S., et al. (2016): Auswirkungen räumlich variabler Niederschläge auf die Sturzflutensimulation. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 36.16
- LUTZ, W. (1984): Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. – Mitteilung Nr. 24 des Instituts für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. MALITZ, G. (2005): Grundlagenbericht über Starkniederschlagshöhen in Deutschland (Grundlagenbericht KOSTRA-DWD-2000). Deutscher Wetterdienst, Hydrometeorologie.
- MARKART G., KOHL B., SOTIER B., SCHAUER T., BUNZA G., STERN R. (2004): Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflusswertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen. – BFW – Dokumentation Nr.3, 89 S.
- MERZ, B. (2007): RIMAX Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse, GeoForschungsZentrum Potsdam.
- MERZ, R. & BLÖSCHL, G. (2002) Marktüberblick und Beispiele – Software für die NA-Modellierung. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 164. Niederschlag-Abfluss Modellierung - Simulation und Prognose, Institut für Hydraulik, TU Wien, S. 223-242.
- MERZ, R., BLÖSCHL, G. & PARAJKA, J., (2006) Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 50(1), S. 2-11.
- MERZ, R. & BLÖSCHL, G. (2008) Informationserweiterung zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 52(6), 300-309.
- MERZ, R. (2009): Methoden zur Bestimmung des Bemessungshochwassers. Wiener Mitteilungen Band 216: Hochwasser: Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage
- MESSMER, M., GÓMEZ-NAVARRO, J. J., RAIBLE, C. C. (2015): Climatology of Vb cyclones, physical mechanisms and their impact on extreme precipitation over Central Europe, Earth Syst. Dynam., 6, 541-553
- MUDELSEE, M., BÖRNGEN, M., TETZLAFF, G., GRÜNEWALD, U. (2004): Extreme floods in central Europe over the past 500 years: Role of cyclone pathway "Zugstrasse Vb", Journal of Geophysical Research, Vol. 109.
- NAEF, F. (1993): Der Abflusskoeffizient: einfach und praktisch? – In: Aktuelle Aspekte in der Hydrologie. Zürcher Geographische Schriften, Heft 53, Verlag Geographisches Institut ETH Zürich, 193-199.
- NISSEN, K. M.; ULBRICH, U.; LECKEBUSCH, G. C. (2013): Vb cyclones and associated rainfall extremes over Central Europe under present day and climate change conditions. Meteorologische Zeitschrift Vol. 22 No. 6 (2013), p. 649 – 660
- OTT, M. (1997) Untersuchungen zur Ermittlung regional gültiger Hochwasserabflüsse am Beispiel des südbayerischen Donauraums. –Schriftenreihe des FG Wasserbau und Wasserwirtschaft, Band 5, Uni Kaiserslautern.
- RESZLER, C., et al. (2006): Ein Ansatz zur Identifikation flächendetailierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 5, 2006.
- SCHERRER, S. (1997): Abflussbildung bei Starkniederschlägen: Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 147.
- SCHERRER, S., NAEFF, F. (2003): A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. Hydrological Processes, 17: 391-401.

- SCHLÜTER, I., SCHÄDLER, G. (2008): Abschätzung der Variabilität extremer Niederschläge für das Hochwassermanagement. Haberlandt, U. [Hrsg.] Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung : Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden ; Beiträge zum Tag der Hydrologie, Hannover, 27.-28.März 2008 Hennef : DWA, 2008 (Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung ; H.23.08)
- SEIBERT, S.P., SKUBLIC, D., EHRET, U. (2014): The Potential of coordinated reservoir operation for flood mitigation in large basins - a case study at the Bavarian Danube using coupled hydrological-hydrodynamic models. *Journal of Hydrology* 517, 1128-1144. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.06.048
- STAHL, N., BAUER, A., LANG, T. (2016): Standortbewertung potenzieller Hochwasserrückhalte-standorte durch eine Wirkungsanalyse mittels Niederschlags-Abfluss-Modellierung und 2D-Berechnung am Beispiel des Isareinzugsgebietes. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (60), Heft 3, Juni 2016, S. 213-221
- STAHL, N. (2016): Vergleich Berechnungsergebnisse in LARSIM mit unterschiedlichen Floodrouting-Verfahren, LARSIM Anwendertreffen 2016, Online Ausgabe.
- STUCKI, P., RICKLI, R., BRÖNNIMANN, S., MARTIUS, O., WANNER, H., GREBNER, D., LUTERBACHER, J. (2012): Weather patterns and hydroclimatological precursors of extreme floods in Switzerland since 1868, *Meteorologische Zeitschrift* Vol. 21 No. 6 (2012), p. 531 – 550
- US-SCS (1972): *Nationale Engineering Handbook* Sektion 4 Hydrology, US Department of Agriculture
- VAN BEBBER, W. J. (1891): Die Zugstraßen der barometrischen Minima nach den Bahnenkarten der deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875-1890.- *Meteorologische Zeitschrift* 8, S. 361-366.
- WEISS, C. (2013): Hochwasserschutz-Aktionsprogramm 2020 – Weiterentwicklung des AP2020 zum AP 2020plus. In: DWA-Landesverband Bayern Mitgliederrundbrief Dezember 2013. München, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 20137
- WILLIAMS, J. R. (1969): Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Trans. ASAE* 12(1): 100-103.
- ZIESE, M., JUNGHÄNEL, T., BECKER, A. (2016): Andauernde Großwetterlage Tief Mitteleuropa entfaltet Ihr Unwetterpotential mit starken Gewittern und massiven Schadensgeschehen in Deutschland, Deutscher Wetterdienst, Online Ausgabe.