

HEFT **36.16**

**Räumliche Heterogenität – Erkennen, Abbilden, Validieren oder Ignorieren?**

Beiträge zum 4. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung

am 5./6. Oktober 2015 in Trier

Markus Casper, Oliver Gronz (Herausgeber)

Veranstalter:

- ≈ Universität Trier – Fachbereich 6 – Physische Geographie
- ≈ Arbeitsgruppe HW 1.3 „Bodenhydrologische Kartierung“ der DWA
- ≈ Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA,  
Aachen, Hennes



**Hydrologische Wissenschaften**

Fachgemeinschaft in der DWA

**Markus Casper und Oliver Gronz (Herausgeber):**

**Räumliche Heterogenität - Erkennen, Abbilden, Validieren oder Ignorieren?**

**Beiträge zum 4. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung am 5. und 6. Oktober 2015 in Trier**

**Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 36.16**

**ISBN: 978-3-88721-306-0**

**DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.36.16**

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, 2016

**Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung**

**Herausgeber:**

Fachgemeinschaft Hydrologische  
Wissenschaften in der DWA  
Geschäftsstelle  
Theodor-Heuss-Allee 17  
D – 53773 Hennef  
Tel.: 02242/872 – 0  
Fax: 02242/872 – 135  
info@fghw.de  
www.fghw.de

**Vertrieb:**

DWA Deutsche Vereinigung  
für Wasserwirtschaft, Abwasser und  
Abfall e.V., Bundesgeschäftsstelle  
Theodor-Heuss-Allee 17  
D – 53773 Hennef  
Tel.: 02242/872 – 333  
Fax: 02242/872 – 100  
vertrieb@dwa.de  
www.dwa.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heribert Nacken  
Fachgemeinschaft Hydrologische  
Wissenschaften in der DWA

**Schriftleitung**

Dr. Christian Reinhardt-Imjela

Dr.-Ing. Uwe Müller  
Hauptausschuss Hydrologie und  
Wasserbewirtschaftung der DWA

**Umschlaggestaltung:**

Dorit Steinberger, Ohlstadt

© FgHW – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 2016

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne schriftliche Genehmigung der Herausgeber in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen werden.

Die wissenschaftliche Richtigkeit der Texte, Abbildungen und Tabellen unterliegt nicht der Verantwortung der Herausgeber.

## **Vorwort**

In 19 Vorträgen und einer Postersession wurde das Thema „Räumliche Heterogenität – Erkennen, Abbilden, Validierung oder Ignorieren?“ behandelt. Mit rund 50 Teilnehmern aus Deutschland, Österreich und der Schweiz mit Beiträgen aus der Praxis und aus der universitären und außeruniversitären Forschung bot die Veranstaltung zahlreiche Gelegenheiten zu Diskussion und Wissenstransfer.

13 ausgewählte Beiträge liegen hier nun auch in schriftlicher Form vor. In allen Beiträgen wird deutlich, dass die Abbildung der räumlichen Heterogenität auf allen Skalenebenen in der N-A-Modellierung eine zunehmend größere Rolle spielt.

In der abschließenden Diskussion ergab sich zudem der Eindruck, dass in den letzten Jahren die Verwendung von hydrologischen Prozesswissen bei der Parametrisierung, Kalibrierung oder Validierung von N-A-Modellen eine zunehmend breitere Anwendung fand. Allerdings ist es oftmals schwierig, bestehende konzeptionelle N-A-Modelle direkt von dieser Entwicklung profitieren zu lassen, da ihre Schwäche meist in der geringen räumlichen Prozessauflösung liegt. Hier bedarf es in Teilen einer Erweiterung der Modellkonzepte um Modellkomponenten, die stärker an den realen Abflussbildungsprozessen orientiert sind.

Der diesjährige Workshop bot allen Beteiligten durch großzügig bemessene Diskussionszeiten einen regen Erfahrungsaustausch.

Der nächste Workshop zur N-A-Modellierung in Trier ist für 2018 geplant.

An dieser Stelle sei allen gedankt, die zum Gelingen dieser Veranstaltung beigetragen haben!

Markus Casper & Oliver Gronz

Trier, Februar 2016



## Heft 36 2016 Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

### 4. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung: „Räumliche Heterogenität – Erkennen, Abbilden, Validieren oder Ignorieren?“

#### Einleitung

*Casper, M., Gronz, O.:*

Zum Umgang mit räumlicher Heterogenität in der N-A-Modellierung 5

#### Messung und Kartierung von Heterogenität im Gelände

*Kohl, B., Klebinder, K., Sotier, B., Markart, G., Meissl, G.:*

Profilansprache, Kartierung, Regensimulation

Erkennen, Abbilden und Validieren der räumlichen Heterogenität von Abflussprozessen 9

*Schneider, R., Thiele-Bruhn, S., Casper, M., Raugewitz, K. N., Schardong, A., Schwab, C.:*

Räumlich und zeitlich hoch auflösende Ermittlung der Oberflächenscherfestigkeit und -rauheit 21

*Zemke, J. J.:*

Beregnungsversuche als Kalibrationshilfe für die Modellierung von Abflussprozessen – Vorstellung einer Kleinberegnungsanlage für den flexiblen Geländeeinsatz 27

#### Heterogenität in Modellparametern

*Dorp, M., Buchholz, O.*

Nutzung der Eigenschaften kleinster räumlicher Einheiten für die Kalibrierung von N-A-Modellen 39

*Haag, I., Luce, A., Henn, N., Demuth, N.:*

Berücksichtigung räumlich differenzierter Abflussprozesskarten im Wasserhaushaltsmodell LARSIM 51

*Antonetti, M., Scherrer, S., Kienzler, P., Margreth, M., Zappa, M.:*

Überprüfung eines prozessnahen Abflussbildungsmoduls auf der Hangskale und in klein- und mesoskaligen Gebieten 63

## **Heterogenität in der hydrologischen Modellierung**

*Hellmers, S.*

Abbildbarkeit mehrfach vernetzter heterogener dezentraler Maßnahmen in N-A-Modellen 75

*Pyka, C. E., Breuer, R., Nacken, H.:*

Synergieeffekte flussgebietsorientierter und grenzübergreifender Modellierung 85

*Ley, R., Hellebrand, H., Casper, M.:*

Abbildung räumlicher Einzugsgebiets-Eigenschaften mit konzeptionellen Modellen 95

*Hellebrand, H., Ley, R., Casper, M.:*

Parameter transfer as a test for hydrological model regionalization strategies 107

*Stahl, N.:*

Vergleich von drei zur Flussgebietsanalyse abgeleiteten synthetischen Hochwassern mit den Originalereignissen unter dem Aspekt Scheitelhöhe und Heterogenität der Ganglinien 113

## **Heterogenität im Modellantrieb, räumlich verteilter Regen**

*Cartus, S.:*

Überschätzte Niederschlagsmengen oder überschätzter Versiegelungsgrad? Unsicherheiten bei der NA-Modellierung in urban geprägten Einzugsgebieten 119

*Lumassegger, S., Achleitner, S., Kohl, B., Formayer, H., Strehz, A., Einfalt, T.:*

Auswirkungen räumlich variabler Niederschläge auf die Sturzflutsimulation 131

## **Autorenverzeichnis**

141

## Zum Umgang mit räumlicher Heterogenität in der N-A-Modellierung

Markus Casper & Oliver Gronz

Räumliche Heterogenität beeinflusst auf allen Skalen die Abflussbildung und Abflusskonzentration in Einzugsgebieten. So ist bereits auf der Plotskala die Infiltrationsfähigkeit der Bodenoberfläche keine konstante Größe, sondern zeigt abhängig vom Ort eine große Variabilität. Neben der Korngrößenverteilung der Bodenmatrix sind hier vor allem Bodenstruktur (Aggregate, Risse), biologische Aktivität (Bodenfauna) oder der Pflanzenbewuchs Determinanten für die hydraulische Leitfähigkeit an der Bodenoberfläche (ZEMKE 2016). Auch Bodenrauheit und die Oberflächenscherfestigkeit sind bereits auf dieser Skala sehr variabel (SCHNEIDER et al. 2016).

Auf der Einzugsgebietsskala treten solche kleinräumigen Muster in den Hintergrund. Auf dieser Skala kann die Abflussreaktion z. B. aus der räumlichen Verteilung der dominierenden Abflussbildungsprozesse abgeschätzt werden (KOHL et al. 2016).

Räumliche Heterogenität bezieht sich in der Hydrologie jedoch nicht nur auf die Eigenschaften des Einzugsgebietes, sondern auch auf den Klima-Input. Denn die raum-zeitliche Verteilung des Niederschlags beeinflusst maßgeblich die Abflussreaktion eines Gebietes (CARTUS et al. 2016, LUMASSEGGER et al. 2016, STAHL 2016).

Räumliche Heterogenität in der Abflussbildung in Einzugsgebieten ist deshalb einer der wesentlichen Gründe weshalb die Abflussreaktionen auf raumzeitlich variierenden Klima-Input oft nicht mit Hilfe einfacher hydrologischer Modelle (Black-Box-Modelle) beschreibbar sind. Zahlreiche Modelle, die heute in der Praxis Anwendung finden basieren auf konkreten Modellvorstellungen zur Abflussbildung, die meist auf der Plot- oder Hangskala ihren Ursprung und damit ihre Gültigkeit haben. Oftmals werden dabei unterschiedlich schnelle Komponenten der Abflussbildung generiert und über die Gebietsspeicher bzw. das Gerinnenetz dann an den Gebietsauslass weitergereicht. Mit diesen Modellen kann prinzipiell räumliche Heterogenität in der Abflussbildung berücksichtigt werden, wenn entsprechende räumliche Informationen zur Verfügung stehen und diese in eine räumliche Parameterstruktur überführt werden (ANTONETTI et al. 2016, DORP & BUCHHOLZ 2016, CASPER et al. 2015, HAAG et al. 2016). In urban überprägten Einzugsgebieten treten die Eigenschaften des natürlichen Einzugsgebietes oftmals in den Hintergrund, hier werden neue Ansätze benötigt, um die räumliche Verteilung von Abflussbildung, Retention oder auch Verdunstung korrekt abbilden zu können (CARTUS et al. 2016, HELLMERS 2016). Da urbane Systeme sehr vulnerabel gegen Sturzflutereignisse sind, kommt der korrekten Schätzung der räumlichen Verteilung des Niederschlagsinputs in besondere Rolle zu (LUMASSEGGER et al. 2016).

In grenzüberschreitenden Einzugsgebieten kann räumliche Heterogenität auch auf einer Metaebene betrachtet werden. Denn mit den Landesgrenzen wechseln oftmals Modellsysteme, Datenverfügbarkeit aber auch die Modellperzeption durch die jeweiligen Nutzer. Hier erfordert die Zusammenführung der Teileinzugsgebiete zu einem validen Gesamtmodell eine intensive grenzüberschreitende Kommunikation und Abstimmung (PYKA et al. 2016).

Eine andere Herangehensweise, räumliche Unterschiede zwischen Einzugsgebieten abzubilden, ist der Versuch, Modelle zu finden, die nur den hydrologischen Effekt eines Landschaftsausschnitts (Speicherung, Dämpfung, Verzögerung des Niederschlags) abbilden. Das bedeutet, dass man für unterschiedliche Landschaftstypen unterschiedliche Modellstrukturen benötigt (FENICIA et al. 2008, LEY et al. 2016). Allerdings ist es fraglich, ob Modellstrukturen bzw. Modellparameter dann auf ähnliche Gebiete übertragbar sind (HELLEBRAND et al. 2016).

Deutlich weiter gehen Ansätze, die u. a. in McDONNELL et al. (2007) und TROCH et al. (2009) skizziert werden. Hier wird eine grundsätzlich neue Theorie eingefordert, um mit Skalenübergängen in der Hydrologie besser umgehen zu können. Im Mittelpunkt steht hierbei die Idee, dass Einzugsgebiete selbstorganisierende Strukturen sind, die sich nach klaren Prinzipien entwickeln. Möglicherweise lassen sich dann Komplexität und Heterogenität auf einfachere Grundmuster zurückführen. Denn es bestehen sehr enge Beziehungen zwischen Klima, Böden, Vegetation und Topografie, die sich aus ihrer Koevolution ableiten lassen. Wasser und hydrologische Prozesse spielen dabei eine zentrale Rolle (McDONNELL et al. 2007). Diese Ideen sind aber noch weit entfernt von einer konkreten praktischen Anwendung, sondern sind Gegenstand aktueller hydrologischer Forschung. Als Beispiel soll hier die DFG-Forschergruppe CAOS angeführt werden (Catchments As Organised Systems, <http://www.caos-project.de/>). Erste Modellierungsansätze dazu finden sich u.a bei SCHAEFLI et al. (2014) und ZEHE et al. (2013).

In der Praxis hat in den letzten Jahren eindeutig die Verwendung von hydrologischem Prozesswissen sowohl bei der Entwicklung von Modellkonzepten als auch bei der Parametrisierung, Kalibrierung oder Validierung von N-A-Modellen eine zunehmend breitere Bedeutung gewonnen. Allerdings ist es oftmals schwierig, bestehende konzeptionelle N-A-Modelle von dieser Entwicklung profitieren zu lassen, da ihre Schwäche meist in der geringen räumlichen Prozessauflösung liegt. Hier wird es dann notwendig, Modellkonzepte um neue Bausteine zu erweitern (ANTONETTI et al. 2016, HAAG et al. 2016).

## Literatur

- 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 36.16, S. 63-74 (in diesem Band).
- CARTUS, S., WERNER, H., KELLER, T., GATTKE, C. (2016): Überschätzte Niederschlagsmengen oder überschätzter Versiegelungsgrad? Unsicherheiten bei der NA-Modellierung in urban geprägten Einzugsgebieten, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 36.16, S. 119-130 (in diesem Band).
- CASPER, M. C., GRONZ, O., GEMMAR, P. (2015): Prozesstreue Parametrisierung und Kalibrierung eines Wasserhaushaltsmodells, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 59.2015 H.4: 136-144.
- DORP, M., BUCHHOLZ, O. (2016): Nutzung der Eigenschaften kleinster räumlicher Einheiten für die Kalibrierung von N-A-Modellen, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 36.16, S. 39-49 (in diesem Band).

- FENICIA, F., SAVENIJE, H. H. G., MATGEN, P., PFISTER, L. (2008): Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement, *Water Resour. Res.*, 44(1), 1944-7973, doi:10.1029/2006WR005563
- HAAG, I. LUCE, A., HENN, N., DEMUTH, N. (2016): Berücksichtigung räumlich differenzierter Abflussprozesskarten im Wasserhaushaltsmodell LARSIM, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 36.16, S. 51-62 (in diesem Band).
- HELLEBRAND, H., LEY, R., CASPER, M. (2016): Parameter transfer as a test for hydrological model regionalization strategies, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 36.16, S. 107-112 (in diesem Band).
- HELLMERS, S. (2016): Abbildbarkeit mehrfach vernetzter heterogener dezentraler Maßnahmen in N-A-Modellen, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 36.16, S. 75-84 (in diesem Band).
- KOHL, B., KLEBINDER, K., SOTIER, B., MARKART, G., MEISSL, G. (2016): Profilsprache, Kartierung, Regensimulation Erkennen, Abbilden und Validieren der räumlichen Heterogenität von Abflussprozessen, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 36.16, 9-19 (in diesem Band).
- LEY, R., HELLEBRAND, H., CASPER; M. (2016): Abbildung räumlicher Einzugsgebietseigenschaften mit konzeptionellen Modellen, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 36.16, S. 95-105 (in diesem Band).
- LUMASSEGGER, S., ACHLEITNER, S., KOHL, B., FORMAYER, H., STREHZ, A., EINFALT, T. (2016): Auswirkungen räumlich variabler Niederschläge auf die Sturzflutsimulation, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 36.16, S. 131-140 (in diesem Band).
- McDONNELL, J. J., SIVAPALAN, M., VACHÉ, K., DUNN, S., GRANT, G., HAGGERTY, R., HINZ, C., HOOPER, R., KIRCHNER, J., RODERICK, M. L., SELKER, J., WEILER, M. (2007): Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology, *Water Resources Research*, 43, W07301, doi:10.1029/2006WR005467
- PYKA, C. E., BREUER, R., NACKEN, H. (2016): Synergieeffekte flussgebietsorientierter und grenzübergreifender Modellierung, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 36.16, S. 85-94 (in diesem Band).
- SCHAEFLI, B., NICOTINA, L., IMFELD, C., DA RONCO, P., BERTUZZO, E., RINALDO, A. (2014): SEHR-ECHO v1.0: a Spatially Explicit Hydrologic Response model for ecohydrologic applications, *Geosci. Model Dev.*, 7, 2733–2746, doi:10.5194/gmd-7-2733-2014.
- SCHNEIDER, R., THIELE-BRUHN, S., CASPER; M., RAUGEWITZ, K. N., SCHARDONG, A., SCHWAB, C. (2016): Räumlich und zeitlich hoch auflösende Ermittlung der Oberflächenscherfestigkeit und -rauheit, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 36.16, S. 21-26 (in diesem Band).
- STAHL, N. (2016): Vergleich von drei zur Flussgebietsanalyse abgeleiteten synthetischen Hochwassern mit den Originalereignissen unter dem Aspekt Scheitelhöhe und Heterogenität der Ganglinien, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 36.16, S. 113-118 (in diesem Band).
- TROCH, P. A., CARRILLO, G. A., HEIDBÜCHEL, I., RAJGOPAL, S., SWITANEK, M., VOLKMANN, T. H. M., YAEGER, M. (2009): Dealing with Landscape Heterogeneity in

Watershed Hydrology: A Review of Recent Progress toward New Hydrological Theory, *Geography Compass* 3(1):375-392, doi:10.1111/j.1749-8198.2008.00186.x

ZEHE, E., EHRET, U., BLUME, T., KLEIDON, A., SCHERER, U., WESTHOFF, M.: A thermodynamic approach to link self-organization, preferential flow and rainfall-runoff behaviour, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 4297-4322, 2013.

ZEMKE, J.J. (2016): Beregnungsversuche als Kalibrationshilfe für die Modellierung von Abflussprozessen – Vorstellung einer Kleinberegnungsanlage für den flexiblen Geländeeinsatz, *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 36.16, S. 27-37 (in diesem Band).

## **Profilansprache, Kartierung, Regensimulation Erkennen, Abbilden und Validieren der räumlichen Heterogenität von Abflussprozessen**

Bernhard Kohl, Klaus Klebinder, Bernadette Sotier, Gerhard Markart, Gertraud Meißl

### **Zusammenfassung**

Als Werkzeug zum Erkennen der räumlichen Heterogenität von Abflussprozessen dienen bodenhydrologische Profilansprachen. Eine prozessorientierte, hydropedologische Standortsbeurteilung ermöglichte es, verschiedene Abflussprozesse am Standort zu differenzieren. Die Abbildung der räumlichen Heterogenität in der Fläche erfolgte über eine Kartierung hydrologischer Reaktionseinheiten. Die Bewertung der hydrologischen Raumwirksamkeit und des Raumbezugs von Standorten ist dabei ein wesentliches Hilfsmittel. Zur Validierung stehen auf der Plotskala bodenphysikalische Messdaten und Starkregensimulationen sowie auf der Einzugsgebietsskala N-A-Modellrechnungen zur Verfügung. Am Fallbeispiel Ruggbach-Einzugsgebiet wird eine Methode der ganzheitlichen Betrachtung der räumlichen Heterogenität von Abflussprozessen von der Abschätzung und Ansprache am Punkt bis zur Abbildung der Prozesse in der Fläche und im N-A-Modell vorgestellt.

### **1. Einleitung**

Eine Arbeitsgruppe der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Wasser und Abfall e.V. (DWA AG HW-1.3) „Bodenhydrologische Kartierung“ erarbeitet seit 2011 eine entsprechende Kartieranleitung. Diese neu entwickelte Anleitung erlaubt es am Standort Abflussprozesse zu erkennen und anzusprechen und über den Raumbezug sowie die Raumwirksamkeit auch die räumliche Heterogenität von Abflussprozessen zu bewerten. Einen ersten Einblick in diese Kartieranleitung gaben WEILER et al. (2015) am 4. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Eine detaillierte Beschreibung wird nach Abschluss der Arbeitsgruppe vorliegen. Im Folgenden wird anhand eines Testgebietes, dem Ruggbach (Vorarlberg, Österreich), die Beurteilung und Bewertung mit Hilfe dieser „bodenhydrologischen Kartieranleitung“ mit den Ergebnissen herkömmlicher Bodenaufnahmen, bodenphysikalischer Laboranalytik sowie Feldexperimenten (Berechnungsversuche) verglichen.

### **2. Das Erkennen der räumlichen Heterogenität von Abflussprozessen**

Das Einzugsgebiet des Ruggbaches in Vorarlberg (Österreich) bietet eine geeignete Fallstudie zum Erkennen, Abbilden und Validieren der räumlichen Heterogenität von Abflussprozessen. Vorliegende Fallstudie basiert auf Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes SeRAC-CC (Sensitivity of the Runoff Characteristics of Small Alpine Catchments to Climate Change), gefördert durch das ACRP-Programm des Österreichischen Klima- und Energiefonds (MEISSL et al., 2014). Der Ruggbach liegt im Bregenzer Wald, am Alpennordrand in der subalpinen Molasse. Das Einzugsgebiet umfasst 7,2 km<sup>2</sup> mit einer Höherenerstreckung zwischen 400 und 1100 m ü.NN. In den Jahren 2011 bis 2013 wurden im Untersuchungsgebiet an einer Vielzahl von Standorten Bodenprofilansprachen ausgeführt (MEISSL et al., 2012). Konzeption, Durchführung und Bewertung der Profilansprachen erfolgten nach den Kriterien der österreichischen Bodenzustandsinventur (BLUM et al., 1996).

Tab. 1: Charakteristika von neun ausgewählten Testflächen im Einzugsgebiet Ruggbach.

Ort	Vegetation	Boden	Humus	SH [m]	Exp.	Neigung
BF1	Wiese	Braunerde	Mull	785	NW	stark geneigt
BF2	Mischwald	Terra fusca	Mull	694	NW	stark geneigt
BF3	Wiese	Braunerde	Mull	803	W	mittel geneigt
BF4	Wiese	Braunerde	Mull	880	SW	mittel geneigt
BF5	Mischwald	Braunerde	Moder	786	NW	sehr stark geneigt
BF6	Mischwald	Braunerde	Moder	784	N	mittel geneigt
BF7	Wiese	Braunerde	Mull	808	S	stark geneigt
BF8	Mischwald	Braunerde	Moder	770	NW	steil
BF9	Mischwald	Braunerde	Moder	770	NW	steil

An neun dieser Standorte wurden ferner Bodenproben für die bodenphysikalische Analytik gewonnen (Tabelle 1). Zusätzlich wurden an diesen neun Standorten mit einer Großregenanlage (80 m<sup>2</sup>) Starkregen unterschiedlicher Intensität simuliert und die resultierenden Abflussprozesse beobachtet und quantifiziert. Abbildung 1 zeigt den Standort der Beregnungsfläche 1 (BF1) mit einem Ausschnitt aus dem Bodenprofil (Mull-Braunerde).

Für alle Beregnungsstandorte wurde nachträglich eine Abflussprozessbeurteilung anhand der neuen „bodenhydrologischen Kartieranleitung“ durchgeführt. Idealerweise wäre die neue Anleitung für die prozessorientierte, hydropedologische Beurteilung am Standort zu verwenden. Im gegenständlichen Fall wurde sie nachträglich auf die Ergebnisse der klassischen Bodenaufnahmen angewandt. Durch die Beibehaltung der Sachbearbeiterin wurde gewährleistet, dass die Beurteilung nach der neuen Anleitung, die im Vergleich zur österreichischen Bodenzustandsinventur oder zur bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5; AG 2005) gezielt hydrologische Merkmale (Substrateigenschaften) erfasst und bewertet, trotzdem korrekt erfolgt.



	Tiefe	SK %	B A	D W
Ah	0-12(14)	5	sU	W2
Bv1	12(14)-32	15	sL	W0
Bv2	32->50	20	IS	W0

Abb. 1: Standort der Beregnungsfläche BF1, Bodenprofil und Auszug der Bodenaufnahme entsprechend der österreichischen Bodenzustandsinventur (BLUM et al., 1996); SK = Bodenskelett > 2 mm Durchmesser, BA = Bodenart, DW = Durchwurzelung.

Abbildung 2 illustriert die daraus resultierende, zusammenfassende hydropedologische Bewertung von Standort BF1 für das Szenario eines einstündigen Regenereignisses mit einer

Regensumme von 82,9 mm. Ein solches Ereignis entspricht am Ruggbach für Bemessungsniederschläge einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren (ehyd.gv.at). Im unteren Teil der Abbildung werden freie und gefüllte Speichervolumina, sowie eine Zusammenfassung und eine abstrahierte Graphik des Raumbezuges dargestellt. Unter trockenen Vorbedingungen ist an diesem Standort von einem freien Retentionsvolumen von 85 mm auszugehen, bei feuchten Bedingungen von ca. 45 mm (Abb.2, rechts unten). Aufgrund des fehlenden Gerinneanschlusses und anderer Merkmale, wie z.B. dem kurzen Abstand zur wirksamen Wasserscheide, wird die hydrologische Raumwirksamkeit des Standortes als durchschnittlich beurteilt.

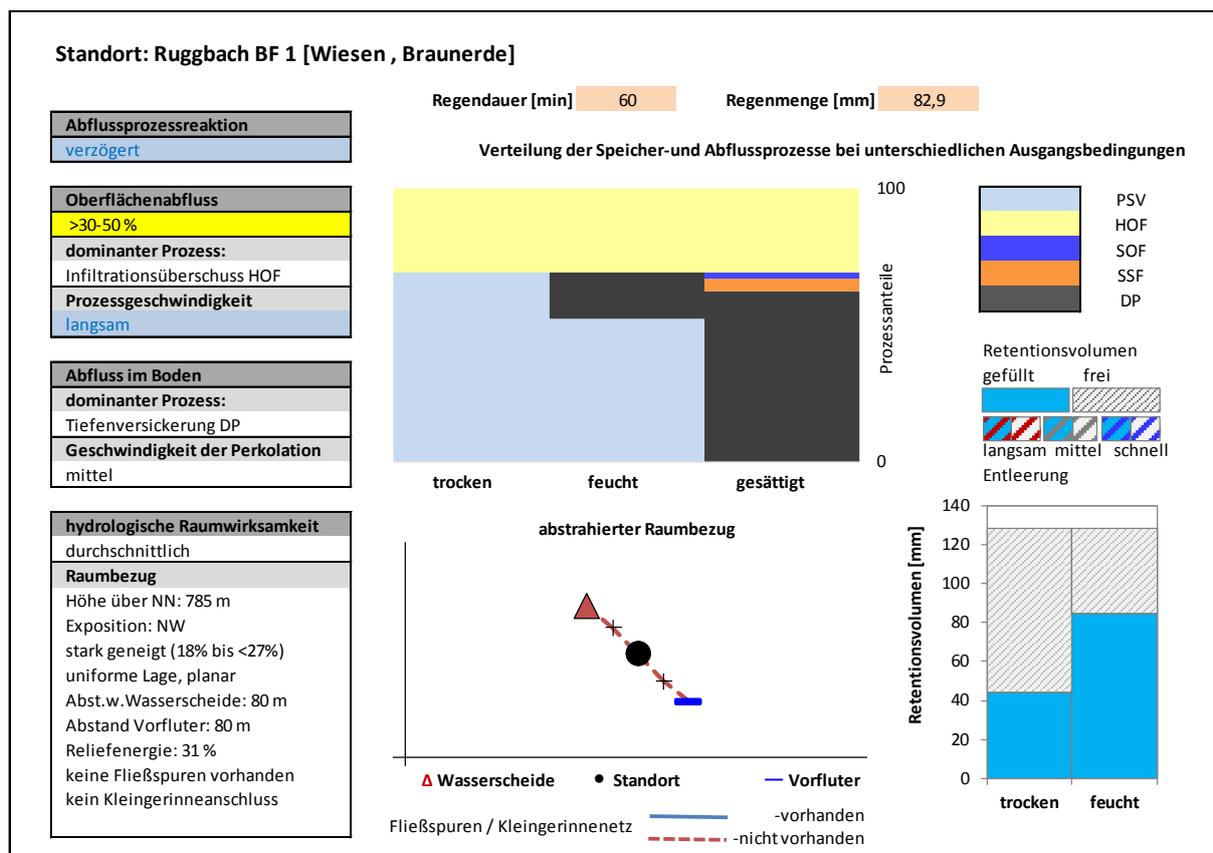


Abb. 2: Zusammenfassende hydropedologische Bewertung von Standort BF1 für ein Szenario Regendauer  $D = 1$  h; Regensumme  $N = 82,9$  mm nach der bodenhydrologischen Kartieranleitung; (Abkürzungen siehe Legende Abb.3).

Der obere Abschnitt der Abbildung zeigt die Beurteilung der Verteilung der Speicher- und Abflussprozesse bei unterschiedlichen Vorfeuchte-Bedingungen. Die „bodenhydrologische Kartieranleitung“ zielt darauf ab möglichst viele Standortsfaktoren als Indizien für bestimmte Abflussprozesse zu finden. An diesem Standort führt Infiltrationshemmung unabhängig von der Vorbedingung zu einem Infiltrationsüberschuss von ca. 30 %. Dieser Horton'sche Oberflächenabfluss fließt aufgrund der festgestellten Standortseigenschaften langsam ab. Im Boden erfolgt der Abfluss bei gesättigten Verhältnissen vornehmlich über die Tiefenversickerung, bei mittlerer Perkolationsgeschwindigkeit. Die gesamte Abflussprozessreaktion unter diesem Regenszenario wird als verzögert eingestuft.

Werden in diesem Bewertungsschema Regendauer und Regenmenge verändert, so ändert sich die Verteilung der Speicher- und Abflussprozesse. Die Intensitätsabhängigkeit von Abflussprozessen wird hier wiedergegeben. Abbildung 3 zeigt die gänzlich andere Reaktion des Standortes für einen 12-Stunden-Regen ( $N = 236,6 \text{ mm}$ ;  $T = 100 \text{ Jahre}$ ). Aufgrund der bedeutend geringeren Regenintensität ( $19,7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) nimmt der Horton'sche Oberflächenabfluss (HOF) ab, mit zunehmender Sättigung tritt zusätzlich Sättigungsflächenabfluss (SOF) auf. Der dominante Abflussprozess im Boden bleibt Tiefenversickerung (DP), wobei ein zunehmender Anteil an Zwischenabfluss (SSF) zu erwarten ist.

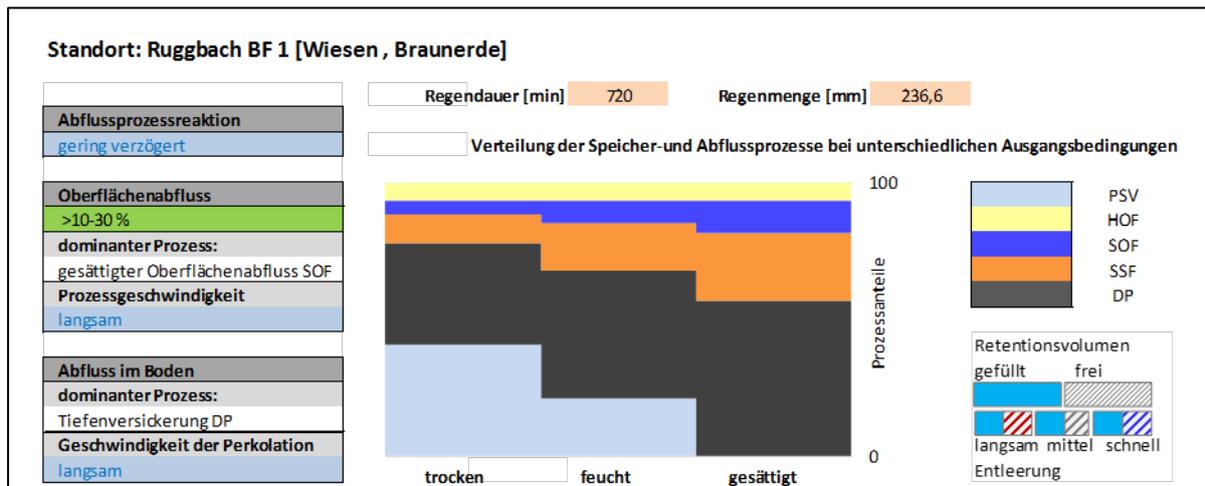


Abb. 3: Zusammenfassende hydropedologische Bewertung von Standort BF1 für ein Szenario Regendauer  $D = 12 \text{ h}$ ; Regensumme  $N = 236,6 \text{ mm}$  nach der bodenhydrologischen Kartieranleitung; PSV = potentielles Speichervolumen, HOF = Horton'scher Oberflächenabfluss, SOF = saturated overland flow (Sättigungsflächenabfluss), SSF = subsurface flow (Zwischenabfluss), DP = Tiefenversickerung.

### 3. Das Abbilden der räumlichen Heterogenität von Abflussprozessen

Das Abbilden und der Transfer von Punktdaten zu Elementarflächen im Sinne von hydrologisch ähnlichen Reaktionseinheiten steht häufig im Fokus der hydrologischen Modellierung. Bislang boten für den Bereich der Abflussbildung Geländeanleitungen z.B. von SCHERRER (2006) oder MARKART et al. (2004) die Möglichkeit eines solchen Transfers von gebietsrepräsentativen Punktinformationen auf die Einzugsgebietsebene. Mit der Anleitung von MARKART et al. (2004) wurde für das Testgebiet Ruggbach auf der Grundlage der Bewertung von Eigenschaften des Bodens, der Vegetation und der Landnutzung eine Abflussbeiwertkarte für den Oberflächenabfluss bei konvektiven Starkniederschlägen erstellt. Dabei werden die punktuellen Ansprachen auf abgrenzbare hydrologische Reaktionseinheiten übertragen.

In ähnlicher Weise ist die neue „bodenhydrologische Kartieranleitung“ zu verwenden, wobei die Beurteilung des Raumbezugs des Standorts die Abgrenzung von Einheiten ähnlicher hydrologischer Reaktion unterstützen soll. Dieserart wurden die Standortsbewertungen und die Kartierung neu interpretiert. Abbildung 4 zeigt die resultierenden Karten des Gesamtabflussbeiwertes für den Oberflächenabfluss bei unterschiedlichen Vorbedingungen.

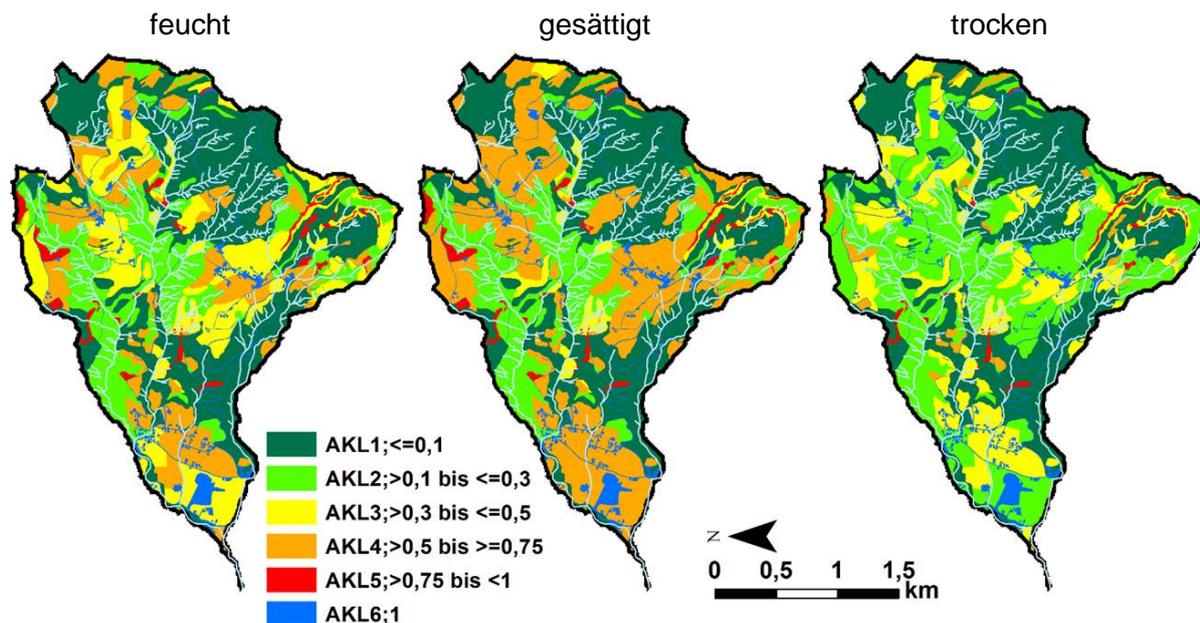


Abb. 4: Gesamtabflussbeiwert des Oberflächenabflusses für unterschiedliche Vorbedingungen (AKL = Oberflächenabflussbeiwertklasse).

In dieser Form lässt sich dementsprechend die räumliche Heterogenität von Abflussprozessen ausgehend vom Standort hin zur gesamten Einzugsgebietsfläche abbilden. Die „bodenhydrologische Kartieranleitung“ stellt hierfür eine neue umfassende Grundlage bereit.

#### 4. Das Validieren der räumlichen Heterogenität von Abflussprozessen

##### 4.1 Bodenphysikalische Analysen und Regensimulation

Bodenphysikalische Untersuchungen an den neun ausgewählten Standorten ermöglichen die Validierung der nach der „bodenhydrologischen Kartieranleitung“ aufgenommenen hydropedologischen Parameter. Texturanalysen zeigen beispielsweise eine deutlich geringere Streubreite als die Felddaten (vgl. Abb.5). Teilweise wird im Feld der Tongehalt überschätzt.

Auf diesen Testflächen wurden überdies insgesamt 19 Regensimulationen mit Niederschlägen unterschiedlicher Intensität und Dauer durchgeführt. Zudem wurden auf jeder der Testflächen die Bodenfeuchte mit TDR-Sonden in verschiedenen Bodentiefen kontinuierlich gemessen. Abbildung 1 (Foto links) zeigt das Starkregenexperiment am Standort der Beregnungsfläche 1 (BF1). Auf der 80 m<sup>2</sup> großen Testfläche wurde bei einer Ausgangsfeuchte zwischen 30 und 35 Vol.% ein Blockregen mit einer Intensität von 109 mm·h<sup>-1</sup> über eine Dauer von 75 min aufgebracht. Nach einer Regenpause von ca. zwei Stunden, wurde unter nun extrem feuchten Vorbedingungen neuerlich ein anfangs betonter Starkregen vergleichbarer Intensität simuliert. Die Bodenfeuchtemessungen ergaben maximale Werte zwischen 38 und 50 Vol.%. Die entsprechenden Hydrographen der gemessenen Oberflächenabflussbeiwerte geben die Abbildungen 6 und 7 wieder. Mit dem N/A-Modell ZEMOKOST (KOHL, 2011) wurden die Regenexperimente nachmodelliert.

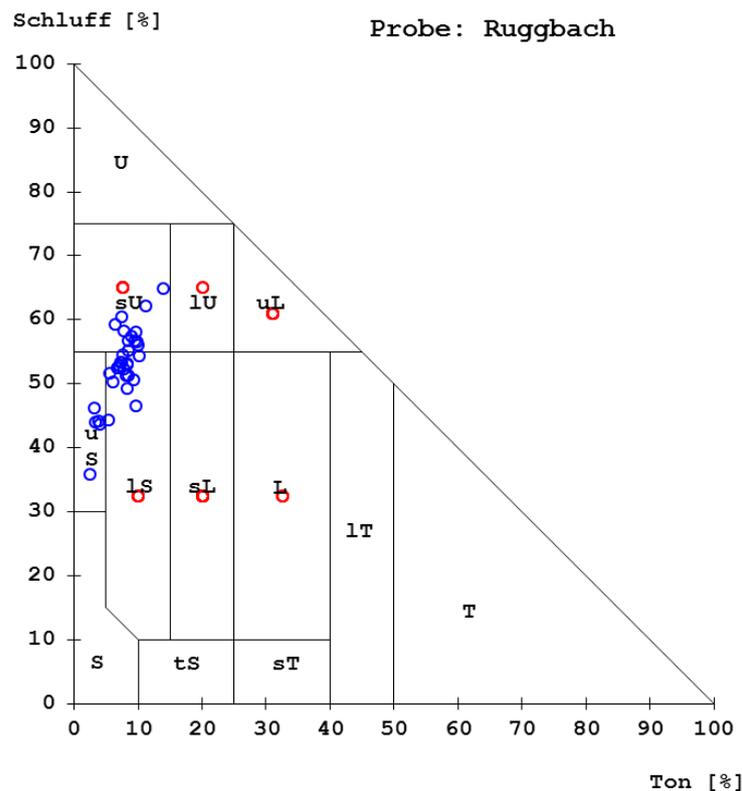


Abb. 5: Textursprache (rote Kreise) und bodenphysikalische Texturanalyse (blaue Kreise) der neun Standorte im Testgebiet Ruggbach (österreichisches Texturdreieck, ÖNORM L1050).

Aus den bodenphysikalischen Daten errechnet sich bis 50 cm Bodentiefe ein Gesamtporenvolumen von ca. 230 mm, umgerechnet aus den Sättigungswerten der Bodenfeuchtemessung liegt dieser Wert bei ca. 208 mm. Das Bewertungsschema der „bodenhydrologischen Kartieranleitung“ ergibt 212 mm (siehe Tabelle 2). Bei einer Ausgangsfeuchte zwischen 30 und 34 Vol.%, dies entspricht bei einer Profilmächtigkeit von 50 cm einer Bodenwassermenge von 161 mm, liegt die Vorfeuchte knapp über der Feldkapazität des Standortes. Das freie Porenvolumen, abhängig von der Herleitung liegt es zwischen 38 und 69 mm, bedingt bei der beaufschlagten Regenintensität eine rechnerische Initialabstraktionszeit zwischen 21 und 38 Minuten. Bei der Erstberechnung betrug die Anlaufzeit (Beginn des Regenexperimentes bis zum Auftreten des ersten Oberflächenabflusses) 19 Minuten. Beim zweiten Versuch mit deutlich höherer Vorfeuchte nahe der Sättigung lag die initiale Zeitspanne lediglich bei 3 Minuten.

Tab. 2: Kennwerte von Bodenwassermengen in [mm] unterschiedlicher Herleitung (LK = Luftkapazität; nFK = nutzbare Feldkapazität; FK = Feldkapazität; GPV = Gesamtporenvolumen; fPV = freies Speichervolumen).

Herleitung	LK	nFK	FK	GPV	fPV
<b>Bodenphysikalische Messung</b>	<b>55</b>	<b>77</b>	<b>156</b>	<b>230</b>	<b>69</b>
<b>„Bodenhydrolog. Kartieranleitung“</b>	<b>44</b>	<b>80</b>	<b>128</b>	<b>212</b>	<b>51</b>
<b>Bodenfeuchtemessung TDR</b>				<b>199</b>	<b>38</b>

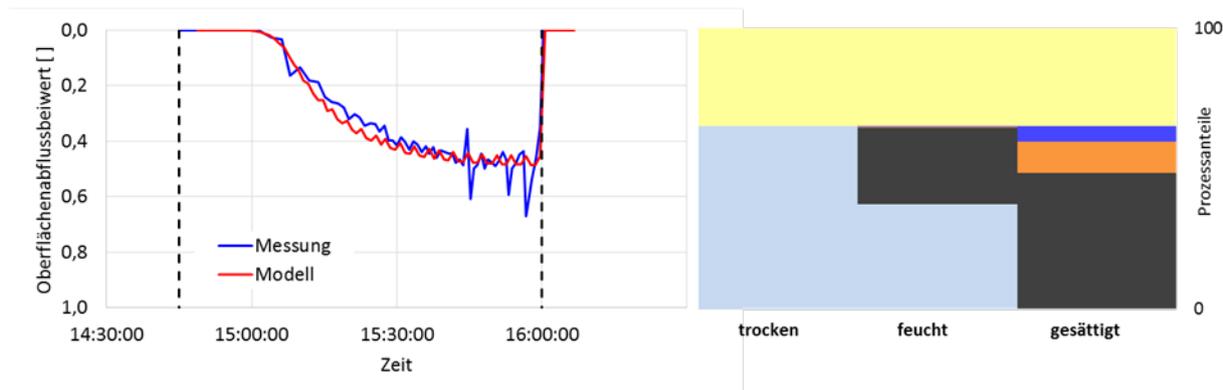


Abb. 6: Gemessene und modellierte Entwicklung des Abflussbeiwertes während einer Starkregensimulation (75 min,  $109 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , Vorbedingung = „feucht“) (links) im Vergleich zur Prozessbewertung der „bodenhydrologischen Kartieranleitung“ (rechts, Farblegende siehe Abb. 3).

Im Rahmen der Unsicherheit der Geländeansprache bodenphysikalischer Kennwerte an skelettreichen alpinen Böden stimmt die mit der „bodenhydrologischer Kartieranleitung“ prognostizierte Verteilung der Speicher- und Abflussprozesse sehr gut mit den Beobachtungen aus den beiden Starkregensimulationen überein. Nach dem Bewertungsschema ergeben sich ca. 40 % Oberflächenabfluss, hauptsächlich als Infiltrationsüberschuss (Hortonscher Abfluss, HOF). Bei konstanter Infiltrationsrate liegt dieser Wert im Beregnungsexperiment bei 46 %. Beim zweiten Experiment (vgl. Abb.7) wurde mehr Oberflächenabfluss beobachtet als vom Bewertungsschema zu erwarten wäre (60 % statt 45 %). Grundsätzlich wäre eine Zunahme des Abflussbeiwertes bei konstanter Infiltrationsrate zwischen den Experimenten mit annähernd gleicher Regenintensität nicht zu erwarten gewesen. Die Endinfiltrationsrate, also die maximale Infiltrationsrate bei Abflusskonstanz, wenn der Bodenspeicher erschöpft ist, sollte eine bodenspezifische, konstante Standorteigenschaft darstellen (MANIAK 2010). Eine mögliche Erklärung dafür kann in der kurzen ca. 2-stündigen Regenpause geortet werden. In dieser Zeitspanne kann ein geringer Teil der Dränporen in der obersten Bodenschicht wieder von oben mit Luft gefüllt werden. Bei neuerlicher Beregnung werden möglicherweise Luftblasen in diesen Dränporen eingeschlossen, dieses entstehende Luftpolster wirkt zusätzlich infiltrationshemmend. Eine weitere Erklärung ist in der Dichtschlammung der Poren aufgrund der Verringerung der Stabilität der Porenwände durch die vorhergehende Aufsättigung zu sehen. Dadurch kommt es zu einer Abdichtung der Porenkanäle, diese verschlossenen Poren können durch spätere Befeuchtungsvorgänge wieder freigespült werden (HARTGE & HORN 2014). Bei der Bodenfeuchtemessung in 5 cm Bodentiefe ist diese Wiederbelüftung bzw. der Lufteinchluss allerdings noch nicht erkennbar. Der Messwert der Bodenfeuchte einer TDR-Sonde gibt jedoch das Integral der Bodenfeuchte im Radius von ca. 3 cm um die Messstäbe wieder, wodurch möglicherweise der Lufteintritt unerkennbar bleibt. Das Phänomen konnte allerdings an Stechprobenzylindern in der Kf-Apparatur im Labor sehr gut reproduziert werden. Die Kf-Werte der gesättigten Bodenproben sanken nach Abtrocknungspausen und nachfolgendem erneutem Einstau deutlich.

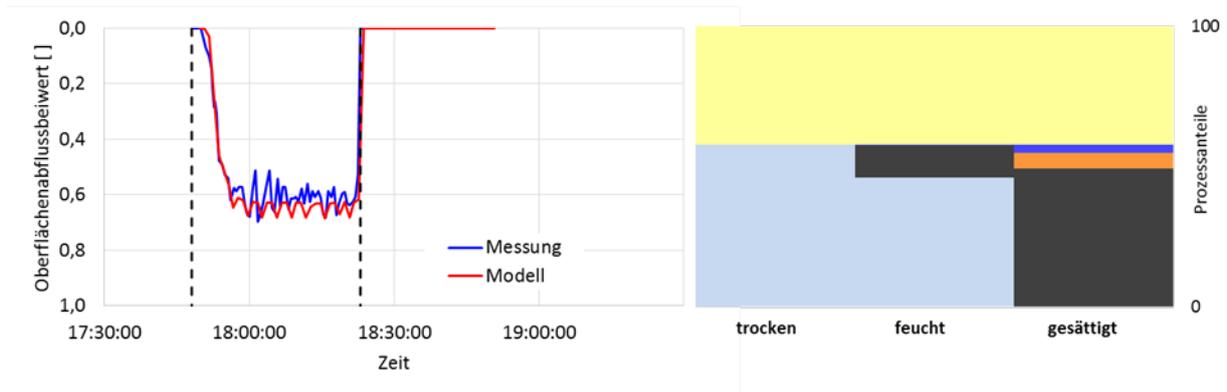


Abb. 7: Gemessene und modellierte Entwicklung des Abflussbeiwertes während einer Starkregensimulation (45 min, 110 mm·h<sup>-1</sup>, Vorbedingung = „gesättigt“) (links) im Vergleich zur Prozessbewertung der „bodenhydrologischen Kartieranleitung“ (rechts, Farblegende siehe Abb. 3).

An der Berechnungsfläche 2, einem Mischwald-Standort auf Terra fusca, kann gezeigt werden, dass das „bodenhydrologische Bewertungsschema“ auch für die Abflussprozesse Sättigungsflächenabfluss (SOF) und Zwischenabfluss (SSF) eine nachvollziehbare Beurteilung erlaubt (Abbildung 8).

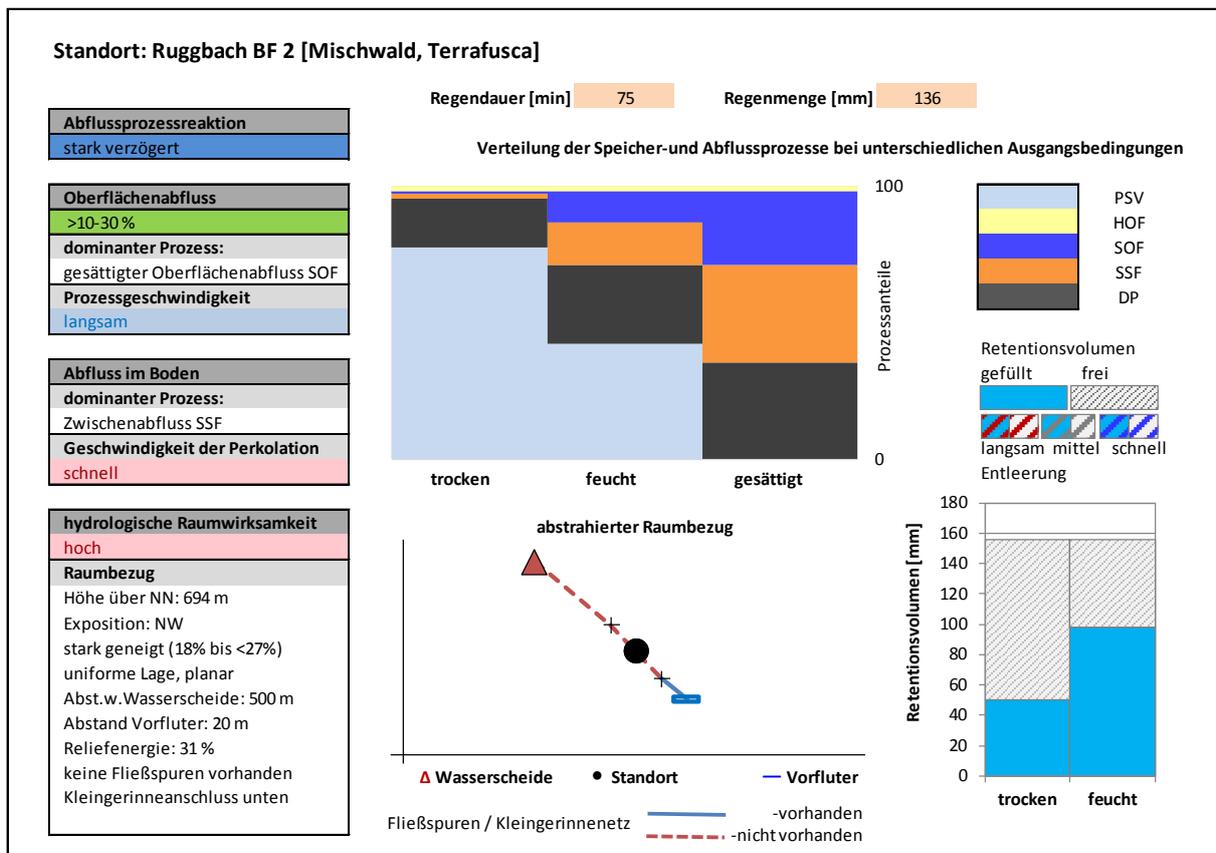


Abb. 8: Zusammenfassende hydro-pedologische Bewertung von Standort BF2 für ein Szenario Regendauer D = 75 min; Regensumme N = 136 mm; (Abkürzungen siehe Legende Abb.3).

Ein Starkregen mit einer Intensität von ca.  $110 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  ergibt an diesem Standort bei annähernder Sättigung ca. 40% Zwischenabfluss, 30 % gesättigten Oberflächenabfluss und ebensolche Tiefensickerung. Der gesättigte Oberflächenabfluss, der im Feldexperiment oberflächennah ca. 5 cm unter Bodenoberkante aufgefangen wurde, wird etwas überschätzt, der Zwischenabfluss dagegen unterbewertet (Abbildung 9). Die Prozesszuordnung und die ermittelte Größenordnung der Abflusskomponenten sind jedoch durchaus realistisch.

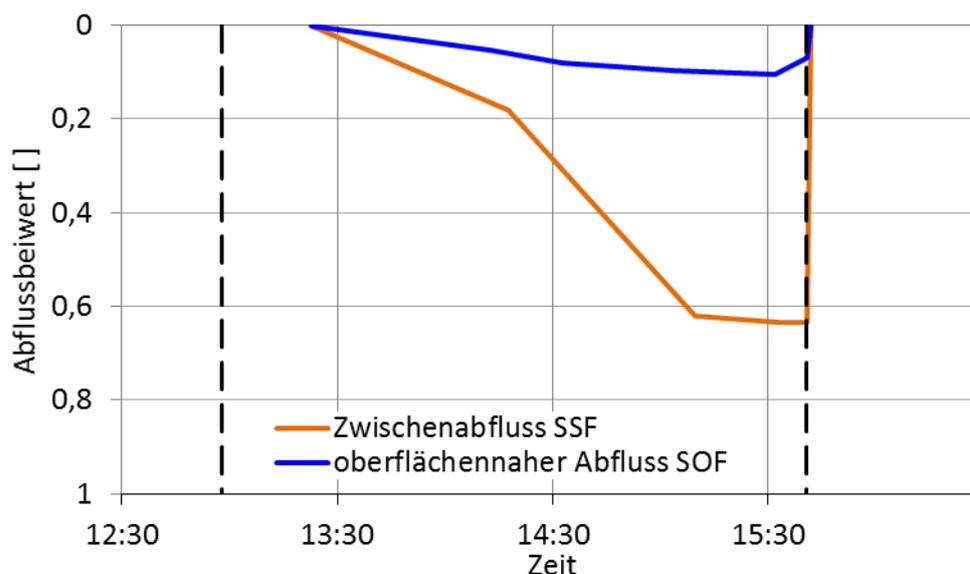
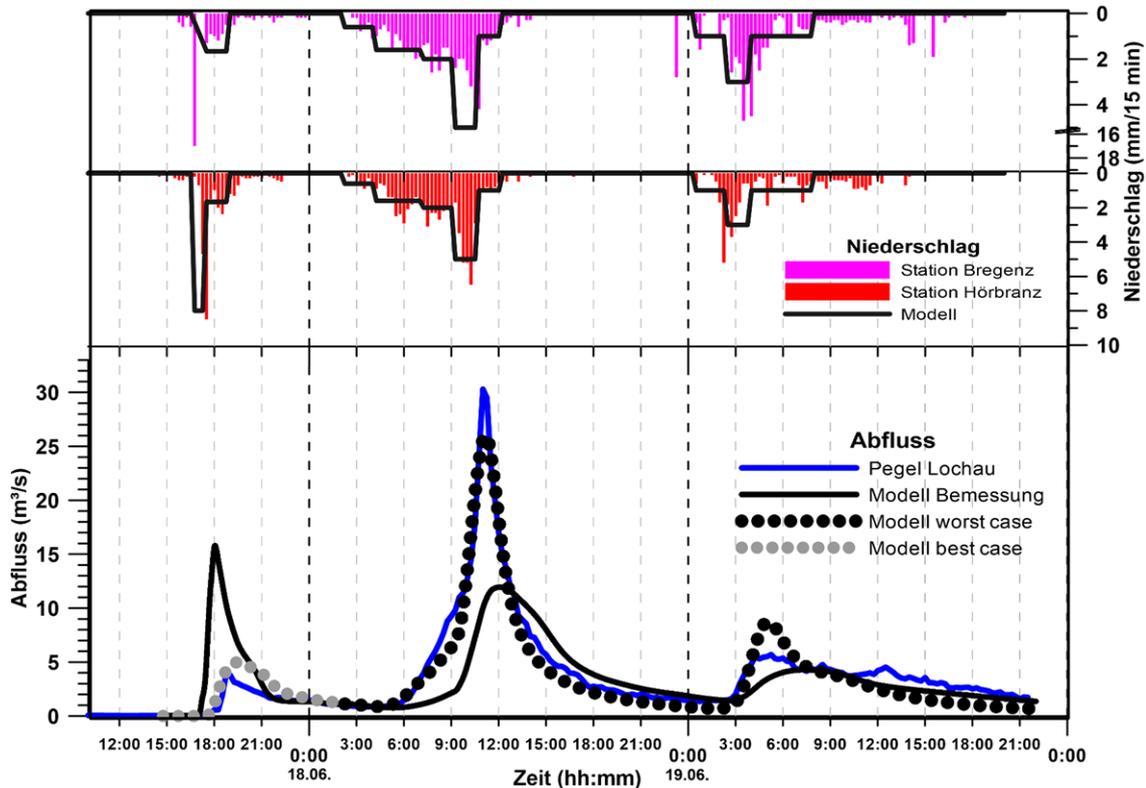


Abb. 9: Gemessene Entwicklung der Abflussbeiwerte oberflächennah und im Zwischenabfluss an der Beregnungsfläche BF2 (Starkregensimulation 75 min,  $110 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

#### 4.2 Ereignismodellierungen

Auf Grundlage der erkannten, abgebildeten und mit Hilfe der Beregnungsversuche validierten Abflussreaktionen bei unterschiedlichen Vorfeuchtezuständen konnte die gesamte Einzugsgebietsreaktion an einigen Ereignissen am Ruggbach durch Modellrechnungen mit dem N/A-Modell ZEMOKOST, einem Ereignismodell, plausibilisiert werden (KLEBINDER et al., 2014).

Abbildung 10 zeigt die Nachrechnungen eines beobachteten Abflussereignisses am Ruggbach (Pegel Lochau) vom 18. Juni 2010. Unter Verwendung der in Abbildung 4 illustrierten Abflussbeiwertkarten unterschiedlicher Vorbedingungen lassen sich die beobachteten Abflussspitzen gut rekonstruieren. Die Ereignismodellierung bei trockenen Vorbedingungen (Modell best case) zeigt eine gute Übereinstimmung mit der ersten beobachteten Abflussspitze. Der zweite Abflusspeak lässt sich bedingt durch die Vorberegnung mit entsprechend gesättigten Verhältnissen (Modell worst case) reproduzieren.



## 5. Schlussfolgerung und Ausblick

Die Arbeitsgruppe „Bodenhydrologische Kartierung“ der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Wasser und Abfall e.V. (DWA AG HW-1.3) strebt danach, die Arbeit an dieser Anleitung 2016 abzuschließen. Die Ergebnisse erster Anwendungen, wie in den vorhergehenden Abschnitten skizziert, sind vielversprechend und lassen ein praktikables hydrologisches Werkzeug erwarten. Eine laufende Optimierung durch gezielte weitere Feldstudien und Anwendungen in Einzugsgebieten ist vorgesehen.

## Literatur

- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN: Bodenkundliche Kartieranleitung, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, Hannover 2005; 5. Aufl., 438 S.
- BLUM W.E.H., SPIEGEL H., WENZEL, W.W. (1996): Bodenzustandsinventur. Konzeption, Durchführung und Bewertung. 2. Auflage. ARGE Bodenzustandsinventur der Österr. Bodenkundl. Gesellschaft. BMLF (Hrsg.).
- HARTGE K.H., HORN R. (2014): Einführung in die Bodenphysik. Bachmann, J, Horn R., Peth S. (Hrsg.), Schweizerbart, 4.Aufl., 372.
- KLEBINDER, K., MEISSEL G., KOHL B., MARKART G., GEITNER C., SCHÖBERL, F. (2014): Sensitivität der Abflussreaktion kleiner alpiner Wildbacheinzugsgebiete auf Änderungen des Systemzustands. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz, 78. Jg. Heft 171, pp. 268 - 279.
- KOHL B. (2011): Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST. Dissertation, Universität Innsbruck, 264.

- MANIAK, U. (2010): Niederschlag-Abfluss-Modelle für Hochwasserabläufe. Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure, 261-360.
- MARKART, G., KOHL, B., SOTIER, B., SCHAUER, T., BUNZA, G., STERN, R. (2004): Provisorische Geländeanleitung zur Anschätzung des Oberflächenabflusses auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW Dokumentation, Nr.3, 83.
- MEISSL, G., KLEBINDER, K., GEITNER, C., SCHÖBERL, F., KOHL, B., MARKART, G., FORMAYER, H., GORGAS, TH., BRONSTERT, A. (2014): Sensitivity of the Runoff Characteristics of Small Alpine Catchments to Climate Change. Endbericht. <https://www.klimafonds.gv.at/foerderungen/gefoerderte-projekte/endbericht/?pid=174745>
- MEISSL, G., KLEBINDER, K., GEITNER, C., SCHÖBERL, F., KOHL, B., MARKART, G., FORMAYER, H., GORGAS, TH., BRONSTERT, A. (2012): Sensitivität der Abflussprozesse kleiner alpiner Einzugsgebiete auf Klimaänderungen. In: Weiler, M. (2012): Wasser ohne Grenzen. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2012 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 31.12, S. 121 - 126.
- ÖNORM L 1050. (2004). Boden als Pflanzenstandort, Begriffe und Untersuchungsverfahren.
- SCHERRER, S. (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. 18. Aufl. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht (Rheinland-Pfalz).
- WEILER et al. (2016): DWA-Prozesskartierung. Vortrag am 4. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung.



## **Räumlich und zeitlich hoch auflösende Ermittlung der Oberflächenscherfestigkeit und -rauheit**

Raimund Schneider, Sören Thiele-Bruhn, Markus Casper, Kyra Nele Raugewitz,  
Aaron Schardong, Christian Schwab

### **Zusammenfassung**

Oberflächenscherfestigkeit und –rauheit sind steuernde Einflussfaktoren der Verschlämmung sowie Abflussbildung und damit auch der Hochwasserentstehung und Bodenerosion. Für die Ermittlung der Oberflächenrauheit gibt es verschiedene messtechnische Lösungen. Während die Messung der Scherfestigkeit von Böden allgemein z. B. anhand von ungestörten Stechzylinderproben gängige Praxis ist und es erste Geräte zur Messung einer flächenhaften Erfassung der Oberflächenscherfestigkeit gibt, fehlt derzeit noch eine Messtechnik zur räumlich hoch auflösenden Datenerhebung. Mit einer neu entwickelten Messgerätetechnik („4S-Schergeräte“) ist es nunmehr möglich, derartige Daten zu generieren. Erste Messungen ergeben eine sehr kleinräumige Heterogenität der Oberflächenscherfestigkeit und –rauheit erosionsanfälliger Böden bei unterschiedlicher ackerbaulicher Nutzung.

### **1. Einleitung**

Die Oberflächenscherfestigkeit und -rauheit von Böden sind entscheidende Steuergrößen hinsichtlich zahlreicher Prozesse in der Landschaft, wie z.B. Abflussbildung, Hochwasserentstehung und Bodenerosion (BRADFORD et al., 1992, ZIMBONE et al., 1996, HORN & PETH 2011). Dabei ist die räumliche und zeitliche Variabilität relevanter Einflussgrößen von entscheidender Bedeutung. Aggregatzerfall, Verschlämmung, Partikelbewegung und damit verbundene Abflussbildungsprozesse (DRP's: dominant runoff processes) sowie Bodenabtrag beginnen punktuell in der Landschaft. Es ist zu erwarten, dass „das schwächste Glied in der Kette die nachfolgende Prozesslawine auslöst“. Sowohl für das Prozessverständnis als auch die Modellierung von z. B. Bodenerosion ergibt sich daher der Bedarf nach räumlich hoch aufgelösten Daten zur Oberflächenscherfestigkeit und –rauheit (NEARING et al., 1991). Insbesondere für stochastische Modellierungsansätze werden entsprechende Daten mit hoher raumzeitlicher Auflösung benötigt (SIDORCHUK 2005, 2009). Die derzeit verfügbaren Geräte zur Messung der Oberflächenscherfestigkeit liefern nur Einzelwerte auf der Punktskala oder kleinflächige, flächengemittelte Messwerte (BRADFORD & GROSSMANN 1982, COLLINS-GEORGE et al., 1993, ZHANG et al., 2001, WOJCIGA et al., 2009). Gängige Praxis ist zudem die Ermittlung der mechanischen Scherfestigkeit des Bodens anhand von z. B. ungestört entnommenen Stechzylinderproben. Eine neue Messtechnik sollte entwickelt werden, die die Möglichkeit zur punktgenauen, räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Erfassung der Oberflächenscherfestigkeit und -rauheit im Labor und im Gelände bietet. Basierend auf einem Prototyp für Laborbedingungen, wurde ein weiterer, mobiler Prototyp für den multifunktionalen Einsatz entwickelt und gebaut. Erste Messungen unter Freilandbedingungen mit dem mobilen „4S-Schergerät“ (**S**oil **S**urface **S**hear **S**trength) dienen der Überprüfung der Funktionstüchtigkeit und Praxistauglichkeit.

## 2. Neue Messtechnik / 4S-Schergerät

Die an der Universität Trier neu entwickelte, mobile Version der 4S-Schergerätetechnik ermöglicht die simultane Erfassung der Scherkraft mittels elektronischem Kraftaufnehmer/Drucksensor, der Oberflächenrauheit mit einem Laser und der Fotodokumentation mit einer Kamera über eine Messstrecke von bis zu 105 cm (Abb. 1). Das aktuelle Schneidwerkzeug aus hochstabilem Werkzeugstahl hat eine Schneide mit einem Schnittwinkel von 15°. Die Schnitttiefe ist variabel. Die Datenerfassung erfolgt mittels eines neu entwickelten Steuerungs- und Messprogramms (Abb. 2). Alle relevanten Informationen können zeitgleich zugeordnet werden (Messwerte, Fotos etc., Abb. 3). Die Bodenoberflächen wurden für die Messungen mit dem Prototyp mit Mehl/Talkum weiß gepudert, um die Laserdistanzmessung zu verbessern (Abb. 3). Eine Weiterentwicklung des mobilen 4S-Schergerätes mit zwei Kameras, einem kompakten Laseraufbau und einer modifizierten Software befindet sich in der Erprobungsphase (Abb. 4).



Abb. 1: Mobiles 4S-Schergerät (Prototyp)

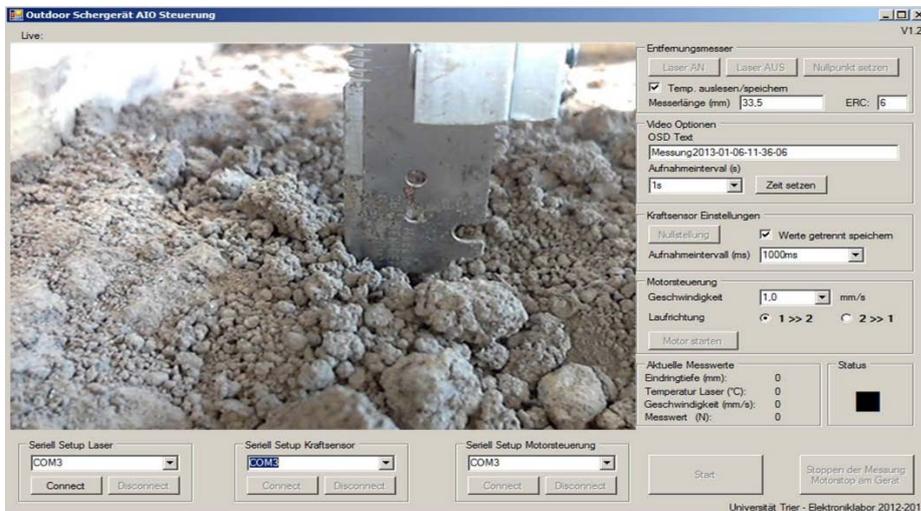


Abb. 2: Steuer- und Messprogramm des mobilen 4S-Schergerätes

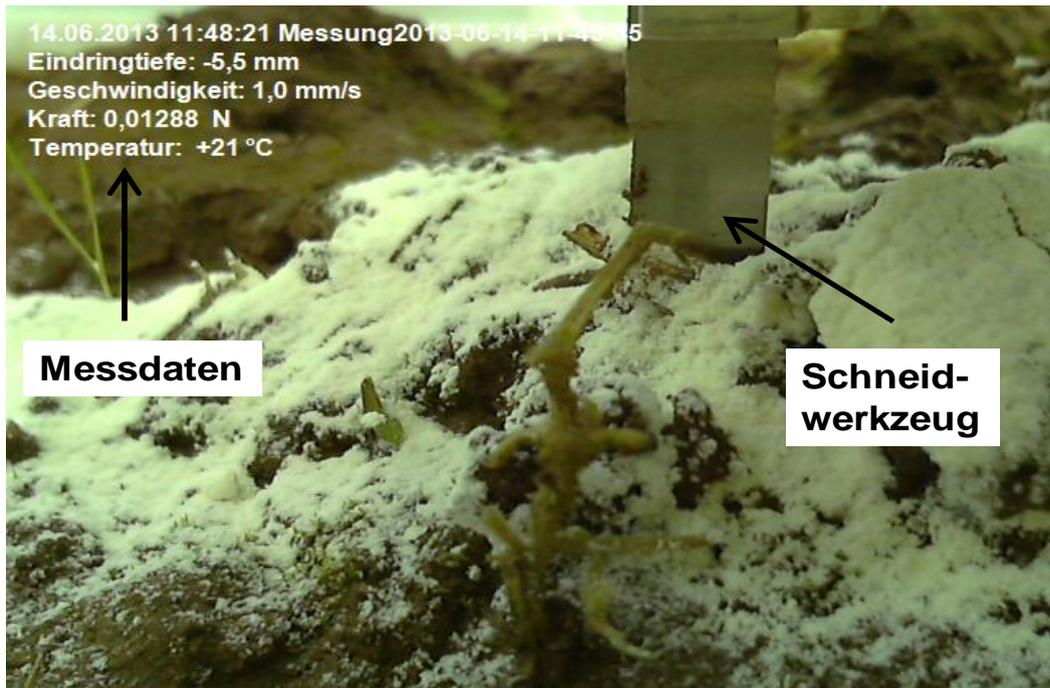


Abb. 3: Kombination aus Messdaten und Fotodokumentation

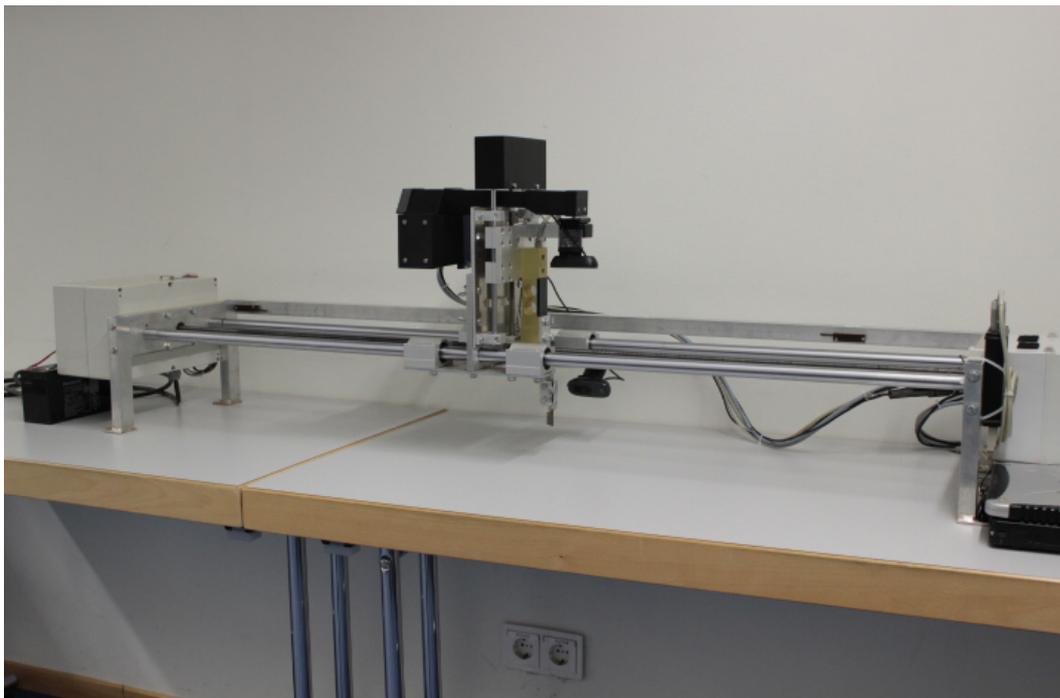


Abb. 4: Weiterentwicklung des mobilen 4S-Schergerätes

### 3. Raumzeitliche Variabilität und Nutzungsvergleich

In einer ersten Feldkampagne sollte unter realen Bedingungen die Praxistauglichkeit des Gerätes getestet und das tatsächliche Auflösungs-niveau ermittelt werden. Hierzu bot sich ein Nutzungsvergleich unter Acker an, da dabei gleichzeitig die Auswirkungen unterschiedlicher Bodennutzungsvarianten auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften oberflächennaher, dünner Bodenschichten untersucht werden konnten.

Die ackerbaulich genutzten Untersuchungsflächen liegen im Moseltal bei Trier auf ebenem Niederterrassenniveau. Es handelt sich um eine lehmig-sandige (SI3-SI4) Auenbraunerde aus fluvialen Sedimenten der Mosel. Für den Nutzungsvergleich wurden benachbarte Ackerschläge ausgewählt, die einerseits mit einer Getreidefruchtfolge und wiederkehrender konventioneller Bodenbearbeitung genutzt werden, andererseits mittels einer seit 25 Jahren etablierten Dauerkultur mit Miscanthusanbau ohne Bodenbearbeitung (Abb. 5).



Abb. 5: Bodenoberflächen einer Auenbraunerde im Moseltal bei Trier unter Miscanthus- bzw. Getreideanbau.

Schon visuell deutlich zu erkennen sind die strukturellen Unterschiede an der Bodenoberfläche. Die Miscanthusfläche ist durch eine sehr unregelmäßige Oberfläche mit einem hohen Anteil gut sichtbarer Aggregate, Wurmlosung und organischer Reste gekennzeichnet (Abb. 5, links), während die Getreidefläche zur gleichen Zeit eine starke Oberflächenverschlammung zeigt (Abb. 5, rechts). Es ergeben sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der gemessenen Scherkräfte für die beiden Nutzungsvarianten (Abb. 6). Unter der Dauerkultur Miscanthus kommt es zu verstärkter Humusakkumulation im Oberboden, erhöhter biologischer Aktivität und damit einhergehender intensiver Bioturbation, die wiederum in Kombination mit der fehlenden Bodenbearbeitung zur Bildung eines stabilen Bodengefüges mit guter Aggregation führt. Die unmittelbar auf der Bodenoberfläche liegenden Aggregate befinden sich jedoch vielfach im lockeren Gefügeverbund und können meist mit dem Schneidwerkzeug relativ leicht verschoben werden, woraus ein Häufigkeitsmaximum der gemessenen Scherkräfte bei geringen Werten resultiert (Abb. 6, links). Es ergeben sich zusätzliche Ansatzpunkte für weiterführende Messungen hinsichtlich der Grenzschubkraft/Lagestabilität von Aggregaten bei Oberflächenabfluss. Die verschlammte Oberfläche des Bodens unter Getreide stellt hingegen eine dünne, kompakte, vergleichsweise homogene Schicht dar, die vom Schneidwerkzeug unmittelbar durchschnitten wird. Aus der Erhöhung der Anzahl mechanisch wirksamer Kontaktstellen zwischen Körnern und Aggregaten infolge der Verschlammung ergibt sich eine Verschiebung zu höheren Messwerten (Abb. 6, rechts).

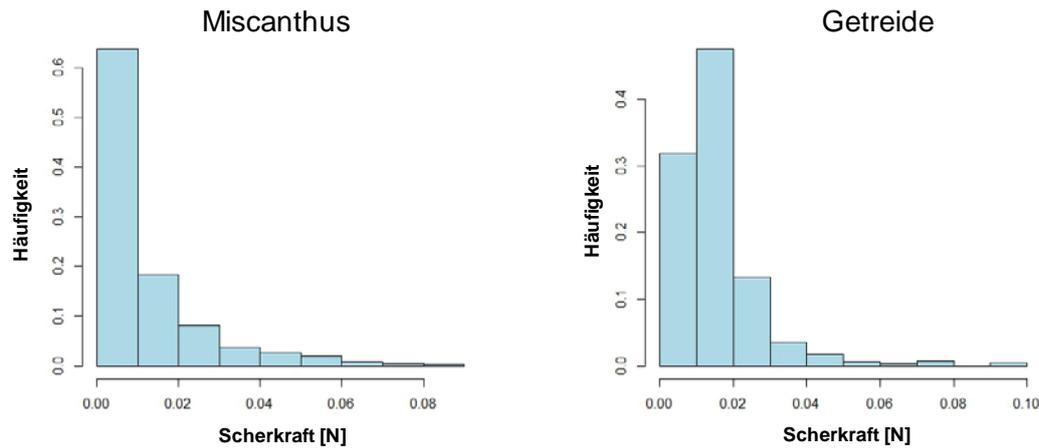


Abb. 6: Häufigkeitsverteilung der Scherkraft der oberflächennahen Bodenschicht bei einer auf 5 mm standardisierten Schnitttiefe bei Miscanthus- bzw. Getreideanbau

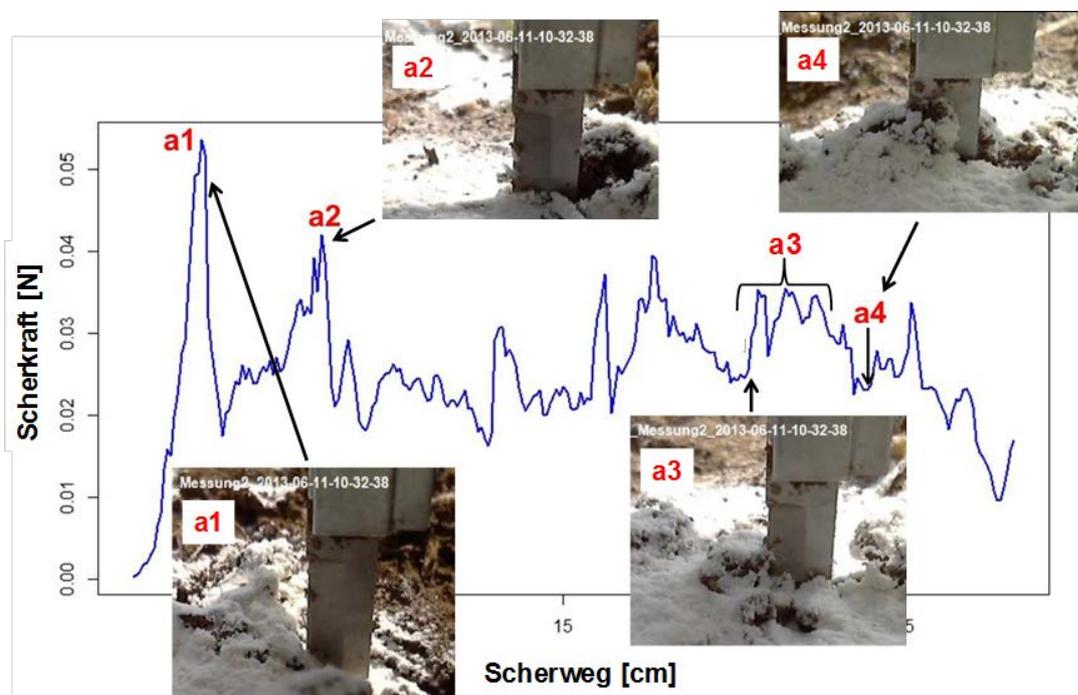


Abb. 7: Räumlich hochaufgelöste Messung der Scherkraft bei Getreideanbau

Die Befunde ergeben zudem eine hochauflösende räumliche Datenerfassung, die aus der Kombination von zeitgleicher Scherkraftmessung, Rauheitsmessung und Fotodokumentation eine unmittelbare prozessorientierte Beurteilung der Messdaten zulässt (Abb. 7, a1-a4):

**a1:** Ein stabil gelagertes Aggregat wird vom Messer durchschnitten. Die Messwerte steigen steil an, erreichen ein Maximum und fallen dann wieder stark ab. Wie diese Messungen ergänzend zur Ermittlung der Aggregatstabilität genutzt werden können, wird derzeit mit dem 4S-Laborscherggerät überprüft.

**a2:** Das Messer schneidet bei mittlerer Schnitttiefe durch eine optisch relativ gleichmäßige Oberfläche. Der Anstieg der Messwerte durch Wurzeln, Steine oder Bodenaggregate, die an der Bodenoberfläche nicht sichtbar sind, zeigt die kleinräumige Heterogenität in der oberflächennahen Bodenschicht.

**a3:** Ein Aggregat wird abgelöst und geschoben, wobei sich seine Position kurzzeitig mehrmals stabilisiert (breiter Anstieg der Messwerte mit mehreren Peaks), was einer wechselnden Lagestabilität von Aggregaten entspricht.

**a4:** Obwohl das Messer eine große Schnitttiefe hat, sinken die Messwerte, da der Boden hier locker gelagert und die Scherfestigkeit in diesem Bereich gering ist.

#### 4. Fazit

Das neu entwickelte, mobile 4S-Schergerät zur simultanen Erfassung von oberflächennaher Scherfestigkeit und Oberflächenrauheit sowie Fotodokumentation liefert neuartige, hoch auflösende Daten bzw. Datenverteilungen für ein fortgeschrittenes Prozessverständnis. Beide Gerätevarianten für den Laborbetrieb (stationär) bzw. Feldeinsatz (mobil) bieten diverse Einsatzmöglichkeiten. Das Feldgerät ist im praktischen Einsatz leicht handhabbar und die maximale Messstrecke von mehr als einem Meter liefert ausreichende Datensätze zur hoch auflösenden Erfassung der kleinräumlichen Heterogenität des Scherwiderstands in einer oberflächennahen, dünnen Bodenschicht und der Oberflächenrauigkeit. Eine Kombination mit Beregnungsversuchen einschließlich Abfluss- und Abtragsmessungen ist in Bearbeitung.

#### Literatur

- BRADFORD, J.M., GROSSMANN, R.B. (1982): In situ measurement of near-surface soil strength by fall-cone device. *Soil Science Society of America Journal* 46: S. 685-688
- BRADFORD, J.M., TRUMAN, C.C., HUANG, C. (1992): Comparison of three measures of resistance of soil surface seals to raindrop splash. *Soil Technology* 5: S. 47-56
- COLLINS-GEORGE, N., Tolmie, P., MOAHANSYAH, H. (1993): Preliminary report on a new method for determining the shear strength of a soil surface – the resin plate method. *Soil Research* 31 (5): S. 539-548
- HORN, R., PETH, S. (2011): Mechanics of Unsaturated Soil for Agricultural Applications. In: HUANG, P.M., Li, Y., SUMNER, M.E. (eds.): *Handbook of Soil Science*, Vol. 1, New York
- NEARING, M.A., BRADFORD, J.M., PARKER, S.C. (1991): Soil detachment by shallow flow at low slopes. *Soil Science Society of America Journal* 55: S. 339-344
- SIDORCHUK, A. (2005): Stochastic modelling of soil erosion and deposition in cohesive soils. *Hydrological Processes* 19(7): S. 1399-1417
- SIDORCHUK, A. (2009): A third generation erosion model: The combination of probabilistic and deterministic components. *Geomorphology* 110 (1-2): S. 2-10
- WOJCIGA, A., BOLTE, K., HORN, R., STEPNIIEWSKI, W., BAJUK, E. (2009): Surface shear resistance of soils on the micro- to mesoscale. *International Agrophysics* 23 (4): S. 391-398
- ZHANG, B., ZHAO, Q.G., HORN, R., BAUMGARTL, T. (2001): Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. *Soil and Tillage Research* 59: S. 97-106
- ZIMBONE, S.M., VICKERS, A., MORGAN, R.P.C., Vella, P. (1996): Field investigations of different techniques for measuring surface soil shear strength. *Soil Technology* 9: S. 101-111

# **Berechnungsversuche als Kalibrationshilfe für die Modellierung von Abflussprozessen – Vorstellung einer Kleinberechnungsanlage für den flexiblen Geländeeinsatz**

Julian J. Zemke

## **Zusammenfassung**

Die Modellkalibration und -validierung anhand von im Feld erhobenen Grundlegendaten ist ein wichtiger Baustein zur Plausibilisierung von modellierten Abhängigkeiten zwischen Niederschlag und Abflussgenese. Häufig stehen jedoch für kleinräumig heterogene Untersuchungsgebiete nur unzureichend differenzierte Daten der wichtigsten hydrologischen Charakteristika zur Verfügung. Eine detaillierte Beschreibung des Infiltrationsverhaltens und der Wasseraufnahmekapazität kann dazu beitragen, die Modellgüte deutlich zu erhöhen. Problematisch sind bei der in-situ Messung jedoch die stetig wechselnden Randbedingungen, bedingt durch die inhomogenen Eigenschaften natürlicher Niederschläge. Auch ist die vollständige Instrumentierung kleinerer Teilflächen materialintensiv und aufwändig. Eine Möglichkeit, diese Probleme zu umgehen, ist die künstliche Erzeugung von Niederschlägen mithilfe von Berechnungsanlagen. Nachfolgend soll eine Kleinberechnungsanlage (KBA) vorgestellt werden, die einen flexiblen Geländeeinsatz und die Beprobung kleinräumiger Flächenanteile ermöglicht.

## **1. Einleitung: Heterogenität hydrologischer Parameter im Raum – ein Grund für die Detailaufnahme auf der Prozessskala**

Im Hinblick auf ihre hydrologischen Eigenschaften kann eine Landschaft als ein gekoppeltes Prozess-Speicher-System verstanden werden. Wird der Niederschlag als Material-Input und der Abfluss aus einem definierten Einzugsgebiet als Material-Output verstanden, so ergeben sich für den Stofftransport verschiedenste Pfade im Raum, die durch unterschiedliche Transportprozesse und beteiligte Speicher gekennzeichnet sind (Abbildung 1). Je nach Fragestellung und gewünschtem Grad der Betrachtungstiefe lassen sich bestimmte Speicher und Prozesse in einem Einzugsgebiet vernachlässigen, so zeigt Abbildung 1 beispielhaft eine vereinfachte Speicher-Prozess-Kette für die Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss ohne die dezidierte Betrachtung der Evapotranspiration oder der Interzeption.

Welche Prozesse und Speicher beteiligt sind, ist stark von der Zusammensetzung einzelner Teilflächen und deren räumlicher Lagebeziehung zueinander abhängig. Auch entscheidet die Eigenschaften der einzelnen Speicher, wie schnell oder wie langsam ein hydrologisches System auf einen Input reagiert, und ob Rückkopplungseffekte oder Schwellenwerte für abweichendes Systemverhalten vorhanden sind.

Daher ist eine Modellkalibrierung auf Basis einer genauen Prozess- und Speicheranalyse anzustreben: Je detaillierter das Wissen um die physikalischen Zusammenhänge auf Prozessebene vorliegt, desto genauere Prognosen und Modellrechnungen lassen sich realisieren. Um dieses Prozessverständnis zu erlangen, sind in-situ Beprobungen der räumlichen Teileinheiten jedoch unabdingbar. Hier kann die vorgestellte Methode der Berechnungsversuche einen wichtigen Baustein darstellen.

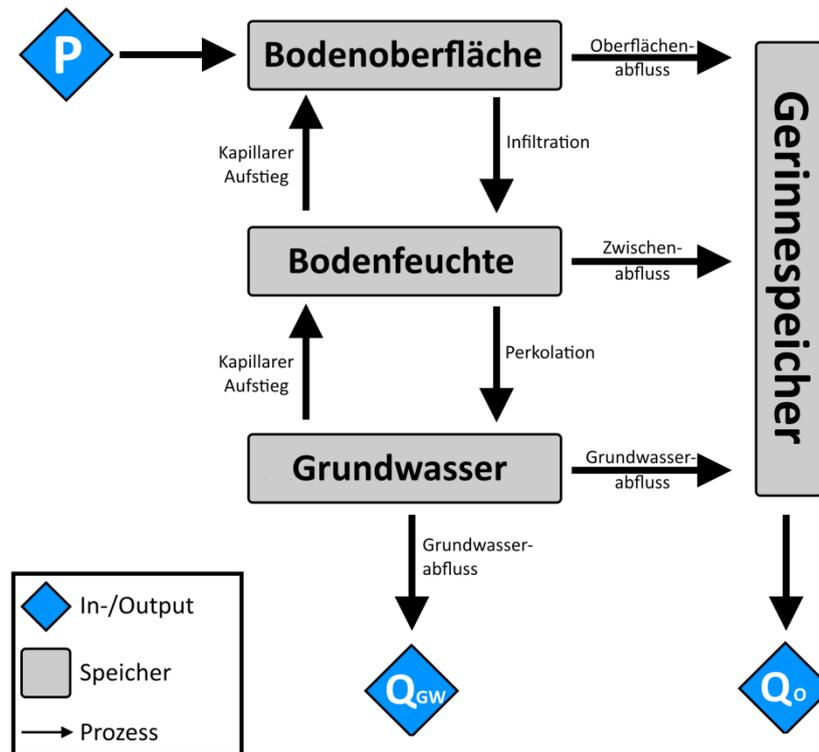


Abb.1: Vereinfachtes hydrologisches Prozess-Speicher-System in einem Einzugsgebiet (nach WILHELM 1993, verändert) mit  $P$  = Niederschlag,  $Q_{GW}$  = Grundwasserabfluss,  $Q_o$  = Oberflächenabfluss.

Im Kontext der vorliegenden Studie soll vor allem die pedologische Ausstattung und ihr Einfluss auf die Bildung von Oberflächenabfluss betrachtet werden. Hauptkomponenten in diesem Teilsystem sind der Bodenkörper als Medium, in dem die hydrologischen Teilspeicher Oberfläche und Bodenfeuchte zusammengefasst werden können, sowie das Verhältnis zwischen den Prozessen Infiltration und Oberflächenabfluss. Die hauptsächlichen Zusammenhänge während eines Niederschlagsereignisses lassen sich vereinfacht nach Abbildung 2 darstellen.

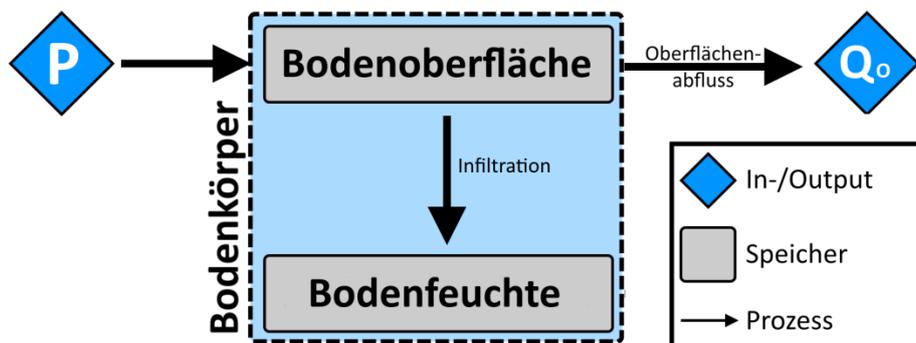


Abb. 2: Vereinfachte Darstellung des hydrologischen Prozess-Speicher-Systems der Pedosphäre während eines Niederschlagsereignisses mit  $P$  = Niederschlag,  $Q_o$  = Oberflächenabfluss.

Exemplarisch lässt sich anhand dieses Teilsystems der Einfluss der Beschaffenheit eines Speichers verdeutlichen: Bei einem Niederschlagsinput entscheiden die Eigenschaften des Bodenkörpers, vor allem die Infiltrationsrate und die Infiltrationskapazität, darüber, wie viel Wasser in welcher Zeit vom Boden aufgenommen werden kann. Eine der bedeutendsten Steuergrößen ist hierbei der Porenraum des Bodens, der unter natürlichen Randbedingungen hauptsächlich von der Bodenart bestimmt ist. Feinere Bodenarten zeigen analog ein feineres Porensystem, welches über geringe Infiltrationsraten verfügt. Dies muss jedoch nicht gleichbedeutend mit einer geringen Gesamtinfiltrationskapazität sein. So kann beispielsweise ein oberflächennaher Horizont mit einer geringen Infiltrationsrate verhindern, dass Wasser in einen darunter liegenden, theoretisch noch aufnahmefähigen Horizont perkoliert. Vor diesem Hintergrund wird zweierlei deutlich: Zum einen zeigt sich, dass bei der Prozessanalyse eine detaillierte Aufnahme der bodenhydrologisch relevanten Randparameter wie beispielsweise Bodenart, Lagerungsdichte und Infiltrationsrate von größter Wichtigkeit ist. Die pauschale Infiltrationskapazität sagt für sich wenig über das Infiltrationsverhalten aus. Zum anderen ist gerade die Infiltrationsrate ein Musterbeispiel für systeminhärente Schwellenwerte, da ab einer kritischen Niederschlagsintensität die Bodenoberfläche den Input nicht mehr schnell genug aufnehmen kann. Dies führt zur oberflächlichen Ableitung des Wassers als Hortonian Overland Flow (HOF). Der HOF stellt dabei den häufigsten Oberflächenabfluss bei Starkregenereignis dar und ist vom Saturation Flow (SF) abzugrenzen, der bei vollständiger Aufsättigung des Bodenkörpers entsteht.

Durch den Umstand, dass Böden selbst kleinräumig über stark heterogene physikalische Eigenschaften verfügen, ergibt sich allein aufgrund dieser vereinfachten Zusammenhänge der Bedarf, ein genaues Prozessverständnis zwischen Infiltration und Abflussbildung zu erlangen.

## **2. Methode: Die Kleinberegnungsanlage der Universität Koblenz-Landau**

Die Verwendung von Beregnungsanlagen ist eine vergleichsweise häufig genutzte Methode der Feldforschung, da sie es ermöglicht, planbare Niederschlagsereignisse auf definierten Flächen zu erzeugen (vgl. z.B. BUTZEN et al., 2014; RIES et al., 2013; CLARKE & WALSH 2007; TOSSELL et al., 1987). Bei der Konzeptionierung einer solchen Anlage kann je nach Fragestellung und Anspruch eine nahezu beliebige Steigerung der Komplexität des Aufbaus vorliegen. Bei einfachen Setups, die lediglich das Verhältnis zwischen Input und Output einer Versuchsfläche betrachten, reicht die genaue Kenntnis der Niederschlagsintensität für die Kalibration aus. Ist jedoch gewünscht eine noch größere Detailtiefe der beobachteten Prozesse zu erreichen, ist auch der künstlich erzeugte Niederschlag gesondert zu kalibrieren. Vor allem wird dann auf das Erreichen eines möglichst realistischen Tropfenspektrums, also die Verteilung von Tropfendurchmesser und -fallgeschwindigkeit, geachtet. Häufig findet eine solche weitergehende Kalibration – wie auch im vorgestellten Beispiel – Verwendung, wenn der Prozess der Bodenerosion auf den Untersuchungsflächen betrachtet werden soll. So kann anhand des Tropfenspektrums die Erosivität des Niederschlags bestimmt werden, die eine Einordnung der gemessenen Bodenabträge ermöglicht.

## 2.1 Aufbau der Anlage

Die KBA der Universität Koblenz-Landau wurde konzipiert, um einen möglichst flexiblen Einsatz in unwegsamem Gelände zu ermöglichen. Daher standen ein geringes Transportgewicht, ein kleines Packmaß und eine batteriegestützte Stromversorgung im Vordergrund der Planungen. Realisiert wurde der Aufbau mit einem Aluminiumkorpus mit abnehmbaren, höhenverstellbaren Beinen. Das Gesamtgewicht der Anlage lag hierdurch bei  $< 5$  kg. Der Wasserkreislauf bestand aus einer Bilgenpumpe (Förderhöhe 4,5 m), die über Schlauchsteckverbindungen mit einer Vollkegeldüse (Typ Lechler 460.608) verbunden wurde. Dieses Grundsetup wurde bereits erfolgreich bei einer KBA der Universität Trier umgesetzt (vgl. ISERLOH et al., 2013). Die Kontrolle des Durchflusses erfolgte mittels Manometer und Sperrhahn, so wurde ein konstanter Betriebsdruck an der Düse ermöglicht. Berechnet wurde ein  $0,64 \text{ m}^2$  messender, quadratischer Plot, versehen mit einem Überlauf, an dem auftretender Oberflächenabfluss und erodiertes Sediment in einer zeitlichen Auflösung von 1 min gesammelt wurden. Abbildung 3 zeigt den Aufbau der KBA auf einem Waldweg. Für die Beregnungsversuche wurde zusätzlich noch ein umlaufender Windschutz installiert, der eine Verwehung der Tropfen verhindern sollte.



Abb. 3: Aufbau der KBA Koblenz im Gelände.

## 2.2 Kalibration und Betriebsdaten

Da die KBA auch für die Analyse von Bodenerosionsprozessen verwendet werden sollte, musste eine vollständige Kalibration der Niederschlagsseigenschaften erfolgen. Dabei wurden

die Parameter der räumlichen Niederschlagshomogenität, des Tropfenspektrums und der Erosivität für definierte Betriebsdrücke erfasst.

Die räumliche Homogenität des Niederschlags wurde über die Berechnung von insgesamt 203 Niederschlagskollektoren ( $\varnothing = 6$  cm) ermittelt, die unterhalb der KBA aufgestellt wurden. Für jeden Kollektor konnte so durch gravimetrische Bestimmung eine individuelle Niederschlagsintensität ermittelt werden. Der resultierende Punktdatensatz wurde dann mittels Kriging-Interpolation auf die Plotfläche extrapoliert, wie beispielhaft Abbildung 4 zeigt.

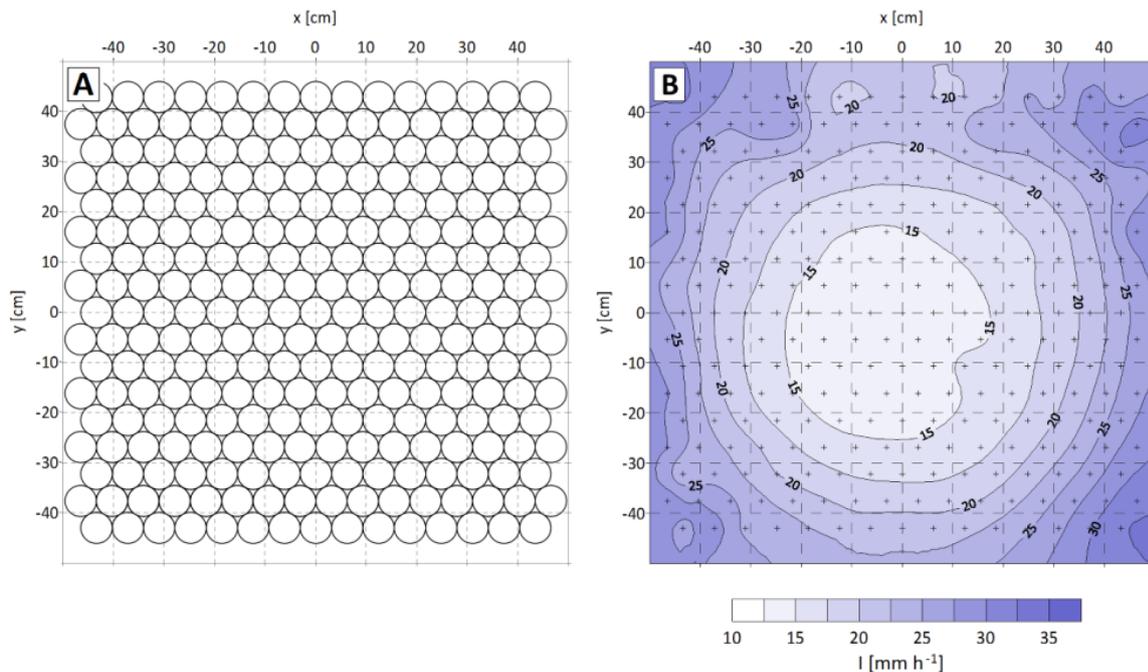


Abb. 4: Intensitätskalibration: (A) Verteilung der Niederschlagskollektoren und (B) Beispielgraphik der interpolierten Intensitätsverteilung.

Durch die Berechnung des Christiansen-Koeffizienten (CU) (CHRISTIANSEN 1942), der die räumliche Homogenität auf Basis des Punktdatensatzes prozentual angibt, konnte die Homogenität der räumlichen Intensitätsverteilung quantitativ ausgedrückt werden. Bei allen Kalibrationsläufen konnte ein  $CU > 80\%$  gemessen werden, dies stellt einen für Beregnungsanlagen anzustrebenden Wertebereich dar (vgl. MAROUFPOOR et al., 2010; KARA et al., 2008).

Für die Messung des Tropfenspektrums konnte ein Laser-Niederschlagsmonitor (LNM) verwendet werden, der eine berührungslose Echtzeitmessung von Tropfendurchmesser und –geschwindigkeit ermöglichte. Der LNM misst dabei alle Tropfen, die zwischen einem Laseremitter und einem Detektor hindurchfallen. Das Ergebnis der Messreihen ist eine detaillierte Kreuztabelle, die kategorisiert nach Tropfendurchmesser und Fallgeschwindigkeit die gemessene Tropfenanzahl wiedergibt. Für die Kalibration der Anlage wurde insgesamt ein Datensatz von 159 Minuten Beregnungsdauer genutzt. Da die Messungen an insgesamt 9 Punkten auf der Plotoberfläche durchgeführt wurden, war abermals eine Interpolation der Messwerte möglich, die Aussagen über die Verteilung der Niederschlagseigenschaften in der Fläche erlaubten (vgl. Abbildung 5).



Neben diesem Starkregensetup erfolgte zusätzlich die Kalibration des nicht durchflussgeminderten Wasserkreislaufs, der einen Betriebsdruck von 0,21 bar aufwies. Im direkten Vergleich beider Einstellungen ist ersichtlich, dass nur wenige, große Tropfen für die erhöhte Intensität und die gleichzeitig höhere kinetische Energie sorgen, da der mediane Tropfendurchmesser  $d_{50}$  in beiden Fällen bei 0,28 mm liegt. Aufgrund des ansonsten ebenfalls zufriedenstellenden Tropfenspektrums bei 0,21 bar lässt sich dieses Setup für schwerpunktmäßig hydrologische Fragestellungen im Kontext weniger intensiver Niederschläge nutzen.

### 3. Ergebnisse: Anthropogen verdichtete Standorte und ihre Bedeutung als kleinräumig heterogene, hydrologische Flächeneinheiten

Ein Haupteinsatzgebiet für die vorgestellte KBA war eine Studie über den Schadeinfluss von Befahrungsverdichtung in Forstgebieten (ZEMKE 2015). Die hier gewonnenen Daten zeigen anschaulich, welcher Erkenntnisgewinn durch die Verwendung der KBA erlangt werden konnte. Durch den Einsatz von schweren Forstmaschinen wird der Oberboden im Bereich von Rückegassen und Fahrwegen stark verdichtet. Resultat dieser Verdichtung ist ein reduziertes Porenvolumen und hierdurch eine signifikant geminderte Infiltrationsrate und -kapazität der Böden.

Der folgende Beispieldatensatz zeigt die Abflusskurven von jeweils 3 x 30 min Beregnung pro Versuchslauf, gemessen mit einer hohen zeitlichen Auflösung von 1 min, wie es der Versuchsablauf während den Arbeiten in ZEMKE (2015) vorsah. Exemplarisch sind in Abbildung 6 die Kurven für einen planierten Weg, eine Rückegasse und einen weitestgehend ungestörten Waldboden zu sehen.

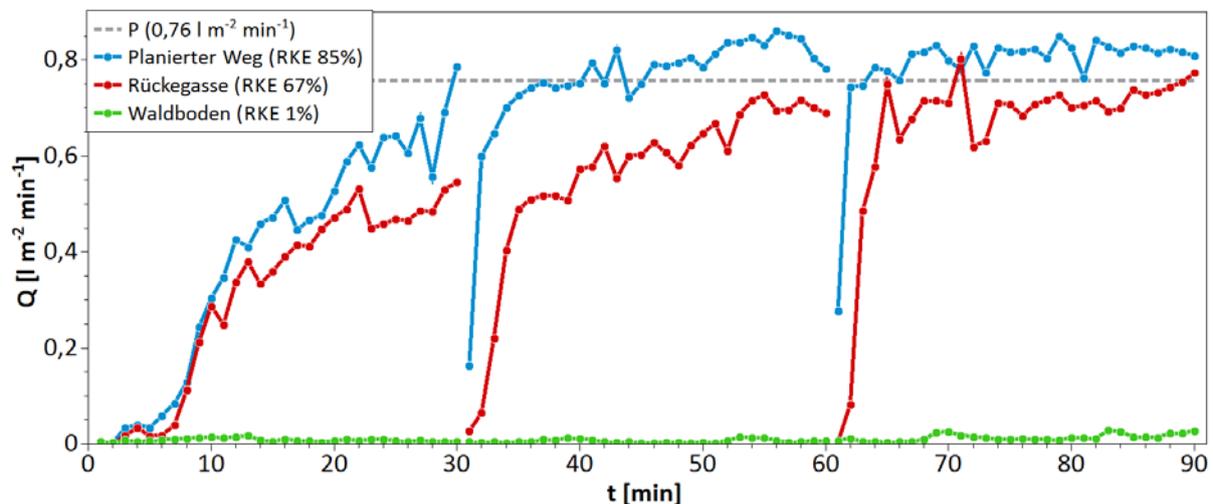


Abb. 6: Abflusskurven für Beregnungsversuche auf einem planierten Weg (blau), einer Rückegasse (rot) und einem unbefahrenen Waldboden (grün).

Anhand der Kurvenverläufe lässt sich erkennen, dass bei steigender Verdichtung der Oberfläche ein höherer Abfluss zu verzeichnen ist, auch verläuft die sukzessive Aufsättigung des Bodenkörpers hier deutlich schneller. Ebenso angegeben ist der Abflusskoeffizient (RKE),

der den prozentualen Anteil des Niederschlagsinputs (in Abbildung 6 als graue, gestrichelte Linie notiert) angibt, der als Oberflächenabfluss gesammelt wurde.

Es ist zu erkennen, dass die bautechnische Veränderung der planierten Wegoberfläche dafür sorgt, dass ein Großteil des Niederschlags direkt als schneller Oberflächenabfluss abgeleitet wird (RKE 85%). Doch auch die Befahrung von nicht gesondert geschütztem Waldboden sorgt für eine derartige Verdichtung des Oberbodens, dass vergleichbare Abflüsse induziert werden konnten (RKE 67%). Besonders anschaulich ist dies im direkten Vergleich mit dem Kurvenverlauf des ungestörten Waldbodens, bei dem lediglich 1% des induzierten Niederschlags als Abfluss messbar war.

Um die Schwankungen der Abflusskurven, die sich aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung ergeben, im Sinne einer klareren Darstellung zu minimieren, bietet es sich an, die Ergebnisse in Zeitintervallen zusammenzufassen, wie es mit den drei Kurven in Abbildung 7 gemacht wurde. Aufgrund des bekannten und konstanten Inputs lassen sich direkte Vergleichsgraphiken mit Abfluss- und Infiltrationsrelationen erstellen. Auch lässt sich für jedes Intervall der RKE bestimmen, dies ermöglicht eine erste Abschätzung beteiligter Abflussprozesse. Bei  $RKE > 90\%$  ist von einer nahezu vollständigen Aufsättigung des Bodens auszugehen, so dass ein sukzessiver Wechsel von HOF zu SF zu erwarten ist. Diese Intervalle wurden in Abbildung 7 gesondert ausgewiesen.

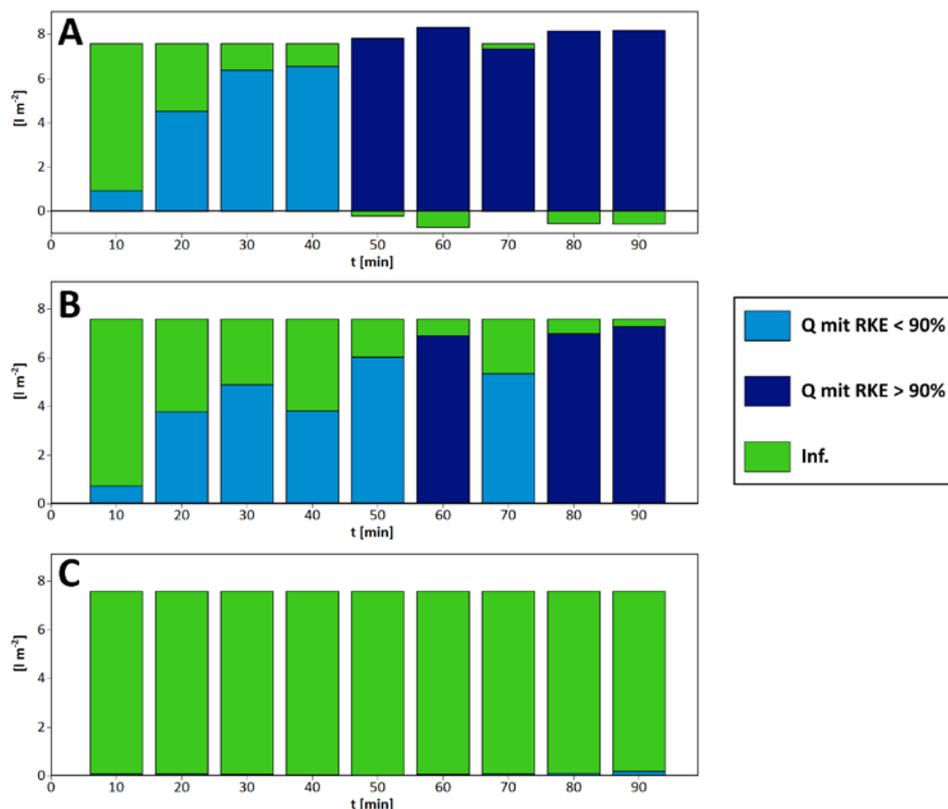


Abb. 7: Abfluss- und Infiltrationssummen für 10-minütige Intervalle bei (A) planiertem Weg, (B) Rückegasse und (C) Waldboden.

Gerade im Falle des planierten Weges sind dabei Intervalle zu erkennen, bei denen mehr Wasser abzufließen scheint, als im gleichen Zeitraum auf die Plotfläche beregnet wird. Dies

resultiert bei der vereinfachten Darstellung in negativen Infiltrationssummen. Diese wenig plausibel wirkende Annahme kann durch den Umstand relativiert werden, dass es auf der Plotoberfläche zu temporärem Rückstau durch Pfützenbildung gekommen ist. Das hier kurzzeitig gespeicherte Wasser floss daher mit einer gewissen Latenzzeit in den Auffangbehälter. Dieser Effekt ist aufgrund der nicht gesondert präparierten Oberfläche nicht zu vermeiden und zeigt ein Problem der sehr genauen Datenaufnahme. Erst durch die singuläre, zeitlich hoch aufgelöste Messung ist diese Werteverteilung zu beobachten, bei längeren und zeitlich weniger hoch aufgelösten Messreihen wäre ein Nivellierungseffekt dieser Abweichungen zu erwarten.

Die betrachteten Waldwege und Rückegassen stellen ein besonders geeignetes Beispiel dar, anhand dessen die kleinräumige Heterogenität des Bodenkörpers im Hinblick auf hydrologische Prozesse aufgezeigt werden kann. Obwohl mitunter nur kleine Teilflächen befahren werden, unterscheiden sie sich deutlich von benachbarten Arealen und können – bei einer entsprechend dichten Erschließung eines Bestandes – dafür sorgen, dass auf übergeordneten Raumskalen Veränderungen in der Abhängigkeit zwischen Niederschlagsinput und Abflussgenese entstehen. Würden beispielsweise in einem dicht erschlossenen Forstgebiet flächendeckend die hydrologischen Eigenschaften eines unbefahrenen Waldbodens angenommen, ergäbe sich ein signifikant höherer Wasserrückhalt im Gebiet, da hohe Infiltrationsraten angenommen werden müssen. Die möglichst detaillierte Berücksichtigung von kleinräumigen Unterschieden ist daher anzustreben, gerade wenn übliche Erschließungsdichten von Forstbeständen angenommen werden, diese liegen im Vergleich mehrerer Quellen in Bereichen von 90 bis 189 Meter Erschließungsweg pro Hektar (vgl. ZEMKE 2015; BUTZEN et al., 2014; TEMPEL 2006). Die flexibel im Gelände einsetzbare KBA ermöglichte aufgrund der kleinräumigen und detaillierten Aufnahme sogar die sichere Differenzierung von Fahrspur- und Zwischenspurbereichen auf Rückegassen. Erstere wiesen im Mittel einen RKE von 69%, letztere nur einen RKE von durchschnittlich 24% auf.

#### **4. Diskussion & Fazit: Methodische Potentiale und Limitierungen beim Einsatz von Beregnungsanlagen**

Die bisher durch die KBA Koblenz gewonnenen Daten zeigen anschaulich das Potential der Methode auf. Der flexible und einfache Aufbau der Anlage ermöglicht es, in kurzer Zeit eine Vielzahl unterschiedlicher Flächen in einem Untersuchungsgebiet hinsichtlich seiner bodenhydrologischen Eigenschaften zu erfassen. Neben den von ZEMKE (2015) durchgeführten Untersuchungen zu Forsterschließungssystemen kam die KBA bereits auf landwirtschaftlichen Flächen (WILDERMUTH 2015, unveröffentlicht) oder auf anthropogen teilversiegelten, urbanen Flächen zum Einsatz. Aktuell erfolgen Untersuchungen auf stark staunassen und vermoorten Standorten im Nationalpark Hunsrück-Hochwald, hier sorgt die Anlagenarchitektur für einen minimalinvasiven Einsatz in ökologisch sensiblen Umgebungen.

Ein weiterer Vorteil der KBA ist die Erzeugung von Starkregenereignissen, die planbar und in engen Wiederkehrzeiträumen realisierbar sind. Gerade diese Extremereignisse sind unter natürlichen Gegebenheiten selten und zugleich schwer zu beproben, wobei sie aber aufgrund der besonders hohen Niederschlagssummen und -intensitäten von besonderem Interesse für die hydrologische Prozessforschung sind.

Dennoch muss methodenkritisch angemerkt werden, dass eine Extrapolation der Daten in der Fläche nur unter Verwendung eines umfangreichen und dispers im Untersuchungsgebiet verteilten Datensatzes möglich ist. Die kleine Untersuchungsfläche bedingt, dass die Stärken der KBA klar im prozessanalytischen Bereich liegen. Durch den erwähnten logistischen Vorteil der einfachen Handhabung lassen sich jedoch in vergleichsweise kurzer Zeit ausreichend umfangreiche Datensätze generieren, die einen zentralen Baustein bei der Modellkalibration liefern können.

### Danksagung

Für die Bereitstellung des LNM und die methodische Hilfe bei der Konzeptionierung der KBA bedanke ich mich bei der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. J. Ries (Universität Trier).

### Literatur

- BUTZEN, V.; SEEGER, M.; WIRTZ, S.; HUEMANN, M.; MÜLLER, C.; CASPER, M.; RIES, J.B. (2014): Quantification of Hortonian overland flow generation and soil erosion in a Central European low mountain range using rainfall experiments. In: *Catena*, 113, 202 - 212.
- CHRISTIANSEN, J.E. (1942): Irrigation by sprinkling. California Agric. Exp. Stn. Bull. 670, University of California, Berkeley.
- CLARKE, M.A. & WALSH, R.P.D. (2007): A portable rainfall simulator for field assessment of splash and slopewash in remote locations. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 2052 – 2069.
- GUNN, R. & KINZER, G.D. (1949): The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. In: *Journal of Meteorology*, 6, 243 - 248.
- ISERLOH, T.; RIES, J.B.; ARNÁEZ, J.; BOIX FAYOS, C.; BUTZEN, V.; CERDÀ, A.; ECHEVERRÍA, M.T.; FERNÁNDEZ-GÁLVEZ, J.; FISTER, W.; GEISLER, C.; GÓMEZ, J.A.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; KUHN, N.J.; LÁZARO, R.; LEÓN, F.J.; MARTÍNEZ-MENA, M.; MARTÍNEZ-MURILLO, J.F.; MARZEN, M.; MINGORANCE, M.D.; ORTIGOSA, L.; PETERS, P.; REGÜÉS, D.; RUIZ-SINOYA, J.D.; SCHOLTEN, T.; SEEGER, M.; SOLÉ-BENET, A.; WENGEL, R.; WIRTZ, S. (2013): European small portable rainfall simulators: a comparison of rainfall characteristics. In: *Catena*, 110, 100 - 112.
- KARA, T.; EKMEKCI, E. & APAN, M. (2008): Determining the Uniformity Coefficient and Water Distribution Characteristics of Some Sprinklers. In: *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11, 214 – 219.
- MAROUFPOOR, E.; FARYABI, A.; GHAMARNIA, H. & MOSHREFI, G.Y. (2010): Evaluation of Uniformity Coefficients for Sprinkler Irrigation Systems under Different Field Conditions in Kurdistan Province (Northwest of Iran). In: *Soil & Water Res.*, 5, 139 – 145.
- MARSHALL, J.S. & PALMER, W. (1948): The distribution of raindrops with size. In: *Journal of Meteorology*, 5, 165 – 166.
- RIES, J. B.; ISERLOH, T.; SEEGER, M.; GABRIELS, D. (2013): Rainfall simulations – constraints, needs and challenges for a future in soil erosion research. In: *Zeitschrift für Geomorphologie*, 57(1), 1 - 10.

- TEMPEL, M. (2006): Abflussverhalten kleiner, forstlich genutzter Bacheinzugsgebiete am Beispiel des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches im Soonwald/Hunsrück. Dissertation zur Erlangung des Grades Doktor der Naturwissenschaften am Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Mainz, 2006.
- TOSSELL, R.W.; DICKINSON, W.T.; RUDRA, R.P.; WALL G.J. (1987): A portable rainfall simulator. In: Canadian Agricultural Engineering, 29, 155 – 162.
- VAN DIJK, A.I.J.M.; BRUIJNZEEL, L.A. & ROSWELL, C.J. (2002): Rainfall intensity – kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. In: Journal of Hydrology, 261, 1 – 23.
- WILDERMUTH, H. (2015, unveröffentlicht): Simulation von Abflussbildung und Bodenerosion auf landwirtschaftlichen Nutzflächen mittels Berechnungsanlage. Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science, Fachbereich 3: Mathematik/Naturwissenschaften, Universität-Koblenz-Landau.
- WILHELM, F. (1993): Hydrogeographie. 3., verbesserte Auflage. Westermann Schulbuchverlag, Braunschweig.
- ZEMKE, J.J. (2015): Messung, Simulation und Modellierung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag auf Wirtschaftswegen in bewaldeten Einzugsgebieten. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften, Fachbereich 3: Mathematik/Naturwissenschaften, Universität Koblenz-Landau.



## **Nutzung der Eigenschaften kleinster räumlicher Einheiten für die Kalibrierung von N-A-Modellen**

Manfred Dorp, Oliver Buchholz

### **Zusammenfassung**

Die Kalibrierung von konzeptionellen Niederschlags-Abfluss-Modellen basiert in der Regel auf der Anpassung von Modellparametern. Die Parameterwerte werden mit Kalibrier-Faktoren in einer größeren Flächeneinheit pauschal vergrößert oder verkleinert, bis Messung und Rechnung ausreichend übereinstimmen.

Ein erweitertes Konzept zur Parametrisierung und Kalibrierung leitet aus Flächen-Eigenschaften wie Gefälle, Feuchte oder Grundwasserflurabstand räumlich differenzierte Prozessraten ab. Sowohl Über- als auch Unterschätzungen der Parameterkennwerte können damit ausgeglichen werden. Die Abflussbildung in ihrer räumlichen Heterogenität wird zutreffender abgebildet. Es ergeben sich gegenüber konventioneller Kalibrierung plausible Abflussbildungsschwerpunkte, die im Hinblick auf Bemessungsfragen relevant sein können.

### **1. Erfahrungen aus der Projektarbeit**

Hydrotec entwickelt das N-A-Modell NASIM seit den 1980er Jahren. In vielen europaweiten Untersuchungen in sehr unterschiedlichen Landschaftstypen und Abflussregimen haben wir langjährige Erfahrungen in der Modellerstellung und –kalibrierung gesammelt. Phänomene und Beobachtungen anhand von Messwerten konnten häufig mit Gebietseigenschaften in Zusammenhang gebracht und so die Kalibrierung verbessert werden.

Anhand von Pegelmessungen kann man z.B. feststellen, dass an trockenen und nassen Standorten in unmittelbarer Nachbarschaft sehr unterschiedliche Abflussbildung bei ansonsten sehr ähnlichen Boden- und Landnutzungsbedingungen stattfindet. Karten des Grundwasserflurabstandes oder der ökologischen Feuchte zeigen den Zusammenhang zwischen Abflussbildung und Feuchtebedingungen mehr oder weniger deutlich.

Messungen auf trockenen Standorten zeigen besonders im Winterhalbjahr keine ausgeprägten Abflussereignisse. Die höchsten Abflussereignisse finden überwiegend in den trockenen Sommermonaten stattfinden. Vermutlich sind sommerliche Regen mit hoher Intensität erforderlich, die nicht versickern und oberflächlich abfließen können. Niederschläge in den Wintermonaten mit geringer Intensität versickern dagegen.

Benachbarte Pegel im Bereich höherer Grundwasserstände bzw. Feuchte zeigen dagegen ausgeprägte Abflussereignisse in den Wintermonaten. Die höchsten Abflussereignisse finden überwiegend in den Wintermonaten statt. Niederschläge mit geringer Intensität bilden auf dem feuchten Untergrund ausgeprägte Ereignisse.

Es besteht offensichtlich ein Zusammenhang zwischen der Abflussbildung und der Feuchte-situation in den Einzugsgebieten. Die Durchsicht einschlägiger Literatur (MENDEL 2000 u. WOHLRAB et al., 1992) zeigt, dass die Abflussbildung häufig im Zusammenhang mit Eigenschaften des Standortes (Wald, Landwirtschaft, Durchlässigkeit von Böden) untersucht wurde. Eine Betrachtung im Zusammenhang mit den langfristigen Feuchtebedingungen fehlt. Diese Bedingungen sind das Ergebnis des Zusammenwirkens unterschiedlicher Eigenschaften (wie Topographie, Pedologie, Geologie, Landnutzung, etc.) eines Standortes. Die Hierarchie dieser Eigenschaften untereinander und die Dominanz einzelner Eigenschaften gegenüber anderen Eigenschaften sind ungeklärt. Die Feuchtebedingungen summieren diese

Eigenschaften als Indiz für die Ausprägung der Abflussbildung. Häufig (aber jeweils singular) untersuchte Eigenschaften wie Boden und Landnutzung tragen zur Feuchtesituation ggf. nur mittelbar bei. Über einen solchen Zusammenhang zwischen Gebietseigenschaften und Abflusscharakteristik lassen sich Annahmen über die Abflussbildung in Form einer Hypothese treffen. Diese können zur räumlich differenzierten Schätzung von Abflussbildungsparametern verwendet werden.

## 2. Wie werden konzeptionelle NA-Modelle üblicherweise kalibriert?

Die Parameterschätzung für Abflussbildungsparameter beruht auf Grundlagen wie Bodenkarten, Flächennutzung und Höhenmodellen. Diese werden zu kleinsten räumlichen Einheiten mit homogenen, für die Abflussbildung relevanten Eigenschaften verschnitten. Diese Einheiten werden z.B. als Elementarfläche, Hydrotop oder Hydrologic Response Unit (HRU) bezeichnet. Die Ableitung von Prozessraten wie Infiltrationsraten ist dann i.d.R. eine Funktion des Bodens oder von Boden und Flächennutzung. Die Prozessraten regeln in der Modellsimulation die Abflussbildung und die Aufteilung auf einzelne Abflusspfade.

Bei der Kalibrierung werden die Prozessraten für die Simulation mit Faktoren linear vergrößert oder verkleinert. Dies geschieht einheitlich für ein Einzugsgebiet mit mehreren Teilgebieten bis zum nächsten Pegel.

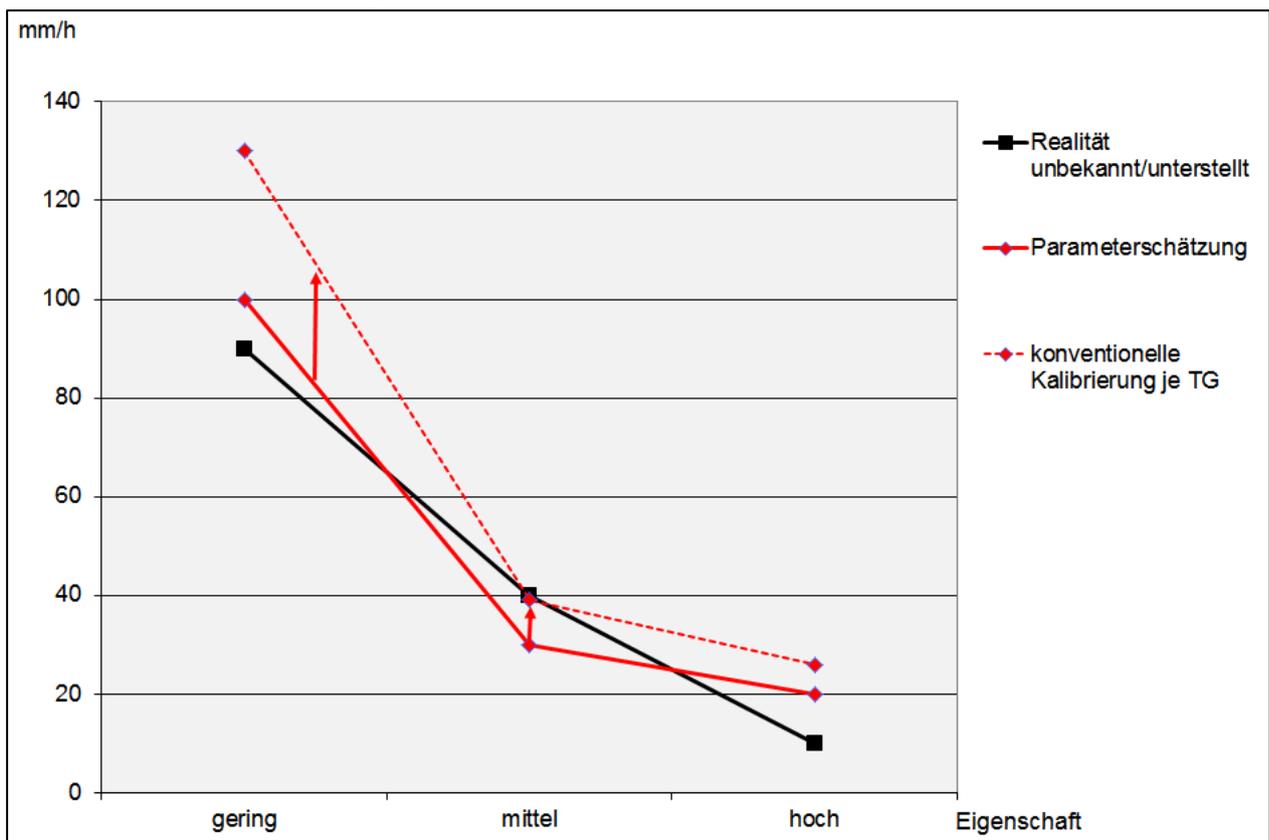


Abb. 1: Effekt der Kalibrierung auf Prozessraten (schematisch)

Bei der konventionellen Kalibrierung konzeptioneller Modelle wird der Parameterwert so angepasst, dass sich Schätzfehler im Raum ausgleichen und am Pegel eine passende Übereinstimmung erzielt wird (Abbildung 1). Sowohl die Parameterschätzung (rot) als auch die

Kalibrierung (rot-gestrichelt) bilden die unterstellte Realität (schwarz) nur für den mittleren Eigenschaftsbereich (die X-Achse stellt hier die Ausprägung einer beliebigen Eigenschaft dar) annähernd passend ab. Die Heterogenität der abflusswirksamen Größen wird räumlich nicht korrekt erfasst.

### 3. Wie kann man Flächeneigenschaften zur Parameterschätzung nutzen?

In NRW stehen landesweite digitale Karten des Grundwasserflurabstandes und der ökologischen Feuchte zur Verfügung. Im Rahmen einer Untersuchung im Einzugsgebiet der Inde (ca. 360 km<sup>2</sup>) für den Wasserverband Eifel-Rur (WVER) wurde der Zusammenhang zwischen Feuchte und Abflussbildung zur Verbesserung der Kalibrierung für eine Langzeitsimulation in ein Konzept umgesetzt und überprüft. Dazu wurden Hypothesen über den Zusammenhang zwischen Flächeneigenschaft und Parameter aufgestellt.

In der bisherigen Hypothese konventioneller Kalibrierung wurde die maximale Infiltrationsrate in Abhängigkeit von der Bodenart und der Nutzung abgeschätzt. Das bedeutet z.B., Sandböden und Waldstandorte haben nach konzeptionellem Verständnis hohe Infiltrationsraten, sonstige Nutzungen, Schluff, Lehm und Ton haben geringe Infiltrationsraten.

Als neue Hypothese auf Grundlage der oben beschriebenen Beobachtungen in anderen Untersuchungen wurde die maximale Infiltrationsrate in Abhängigkeit von der räumlichen Feuchteverteilung abgeschätzt (Abbildung 2).

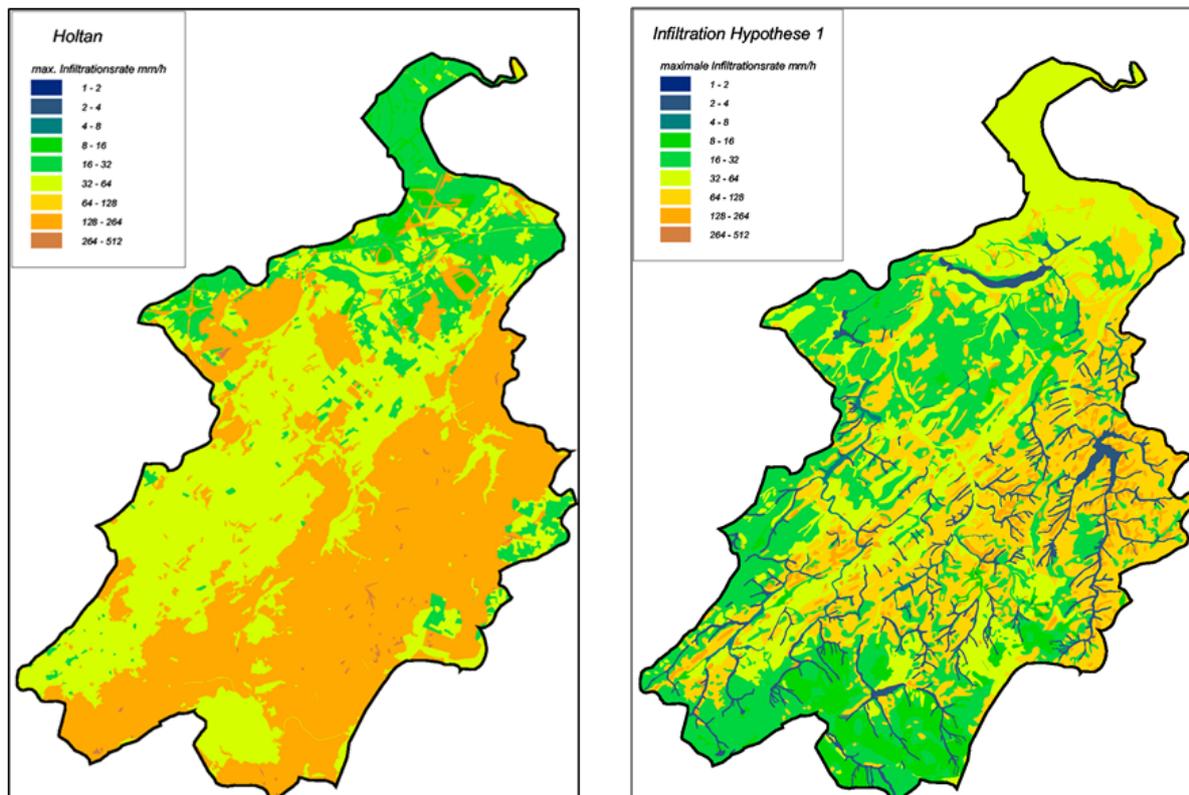


Abb. 2: Infiltrationsraten basierend auf unterschiedlichen Schätzverfahren, links das vorwiegend auf Landnutzungsklassen basierende HOLTAN-Verfahren (HOLTAN 1969), rechts eine Infiltrationshypothese mit Abhängigkeit der Infiltrationsrate von der Feuchte. Dargestellte Einzugsgebietsgröße ca. 360 km<sup>2</sup>.

Das hydrologische Modell NASIM simuliert kontinuierlich den Feuchtegehalt der ungesättigten Bodenzone. Über die Prozesse (Infiltration, Exfiltration, Evapotranspiration usw.) wird der Bodenfeuchtegehalt im Modell bilanziert. In diesem rückgekoppelten System ist die Intensität dieser Prozesse jeweils gleichzeitig eine (nichtlineare) Funktion der aktuellen Bodenfeuchte. Im Modell wird die Abflussbildung für den aktuellen Niederschlag als Oberflächenabfluss (falls die aktuelle Infiltrationsleistung überschritten ist) oder als Sättigungsabfluss (falls die Aufnahmekapazität erreicht ist) berechnet.

Der Parameter maximale Infiltrationsrate beschreibt den Wert der Infiltration bei einer Bodenfeuchte, die dem permanenten Welkepunkt entspricht. Zum Zustand der vollständigen Bodensättigung hin nimmt die Infiltrationskurve exponentiell ab.

Die Abflussbildung wird durch die Infiltrationshypothese in Abhängigkeit von der räumlichen Feuchteverteilung stärker in der Fläche differenziert. In der Fläche ergeben sich andere Antworten einzelner Prozesse. Beispielsweise können trockenere Bereiche gegenüber gleichen oder ähnlichen Bodenarten in feuchteren Bereichen mit unterschiedlichen maximalen Infiltrationsraten versehen werden. Stellt man diese Eigenschaften als Karte dar, erkennt man andere räumliche Muster von Prozessantworten, die zu anderen Abflussschwerpunkten führen. Plausibel erscheint, dass die Gewässer als feuchte Bereiche für die Abflussbildung als relevant sichtbar werden.

Generell lassen sich weitere Hypothesen aufstellen, auch Abhängigkeiten von Eigenschaftskombinationen sind denkbar.

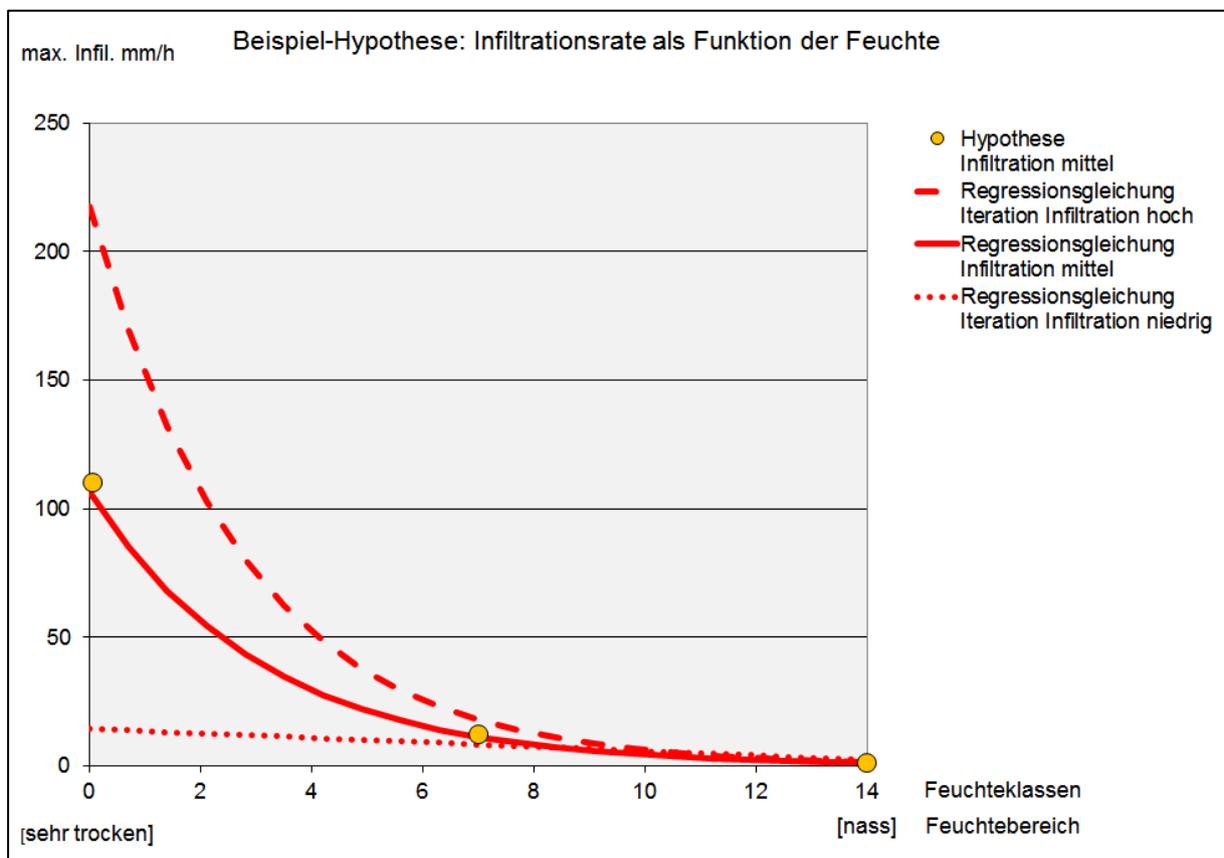


Abb. 3: Hypothetischer Zusammenhang zwischen Eigenschaft und Prozessrate

Der hypothetische Zusammenhang zwischen Eigenschaft und Prozessrate kann graphisch z.B. in Excel dargestellt und verdeutlicht werden, indem man Stützpunkte (orange) der Hypothese ansetzt (Abbildung 3). Diese können durch eine Ausgleichsfunktion (rote Linie) mit Gleichung für alle Stellen der X-Achse berechnet werden.

Durch die Verwendung von Funktionsgleichungen oder Stützpunktkurven kann die Hypothese auch für Massendaten umgesetzt werden, d.h. für jede der vielen Elementarflächen/Hydrotope kann die Prozessrate flächendeckend berechnet werden. Technisch werden dazu Python-Skripte verwendet, die Attribute aus den dbf-Tabellen von GIS-Shapes anhand der Funktionsgleichung umrechnen und in eine XML-Datei schreiben. Über die XML-Schnittstelle des NA-Modells NASIM können die geänderten Werte selektiv zum bestehenden Modelldatensatz hinzugeladen werden.

Weiterhin kann der Zusammenhang der Prozessrate mit der Eigenschaft verstärkt oder abgeschwächt werden (Iterationen einer Hypothese). Diese Iterationen der Hypothese kann man in der Kartendarstellung sichtbar machen (Abbildung 5).

#### 4. Wie kann man Flächeneigenschaften für die Kalibrierung nutzen?

Die oben gezeigte Variation bzw. Iteration der Zusammenhänge zwischen Flächeneigenschaft und Prozessrate beinhaltet bereits das Prinzip der Kalibrierung. Der Zusammenhang kann theoretisch für jeden Stützpunkt der Kurve vergrößert oder verringert werden, so dass eine Anpassung für jeden Punkt der Kurve möglich ist. Der Eingriff erfolgt hier nicht teilgebietsweise wie bei der konventionellen Kalibrierung sondern subskalig und teilgebietsübergreifend in den Elementarflächen bzw. über deren Eigenschaften.

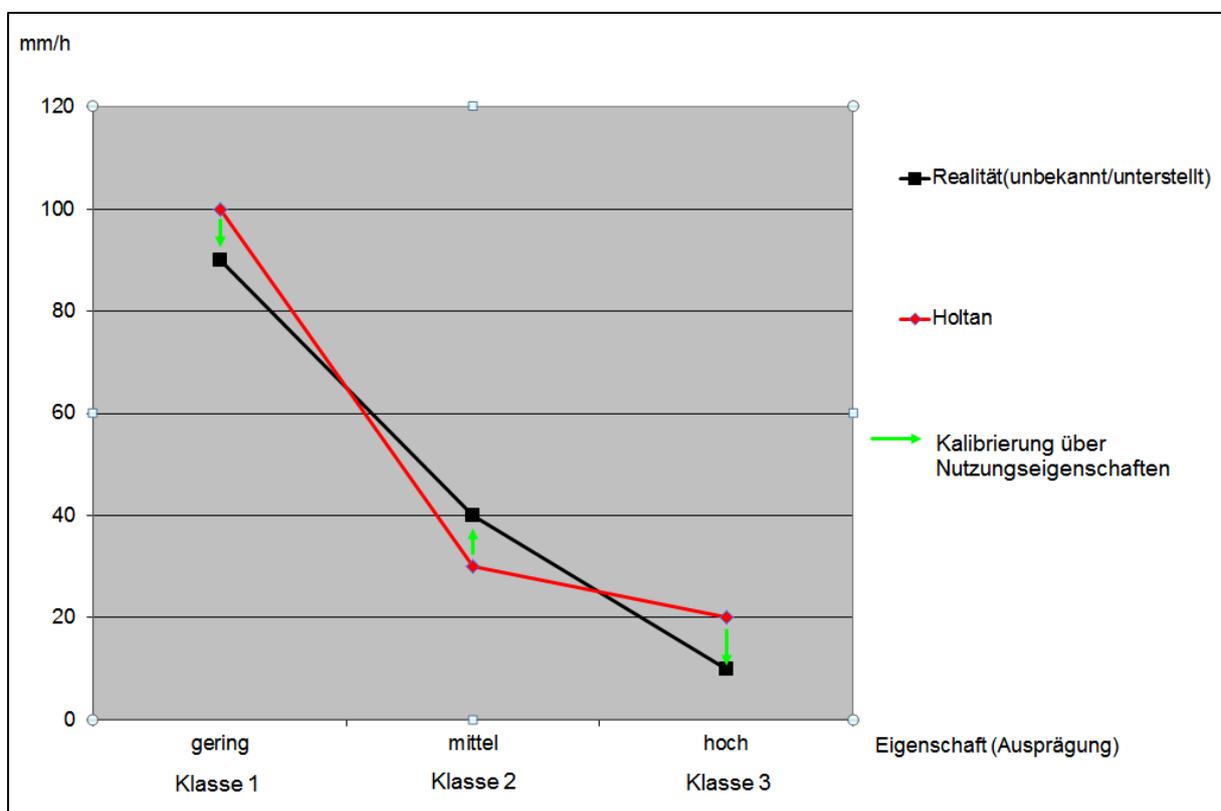


Abb. 4: Klassenweise Anpassung der Prozessraten

Die Prozessraten können in Abhängigkeit von der Ausprägung (z.B. Wald) einer Eigenschaft (Nutzung) ähnlich wie bei einem Mischpult separat angepasst werden. Theoretisch kann so die (unterstellte) Realität abgebildet werden (Abbildung 4).

Die eigentliche Kalibrierung erfolgt durch Aufstellung neuer Hypothesen oder die Iteration bestehender Hypothesen. Hypothese 1 wurde so variiert, dass die deutlichen Unterschiede der Infiltrationsraten zwischen trockenen und feuchteren Flächen verringert wurden. Die Auswirkungen wurden jeweils in Modellsimulationen überprüft (Abbildung 5).

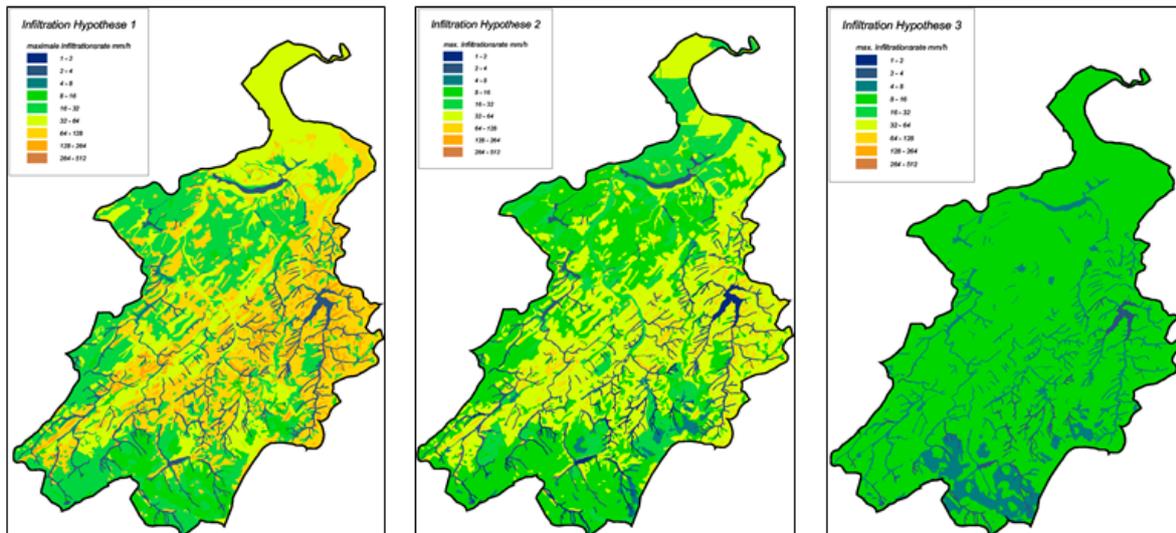


Abb. 5: Hypothesen 1 bis 3 für die räumliche Verteilung der Infiltrationsrate

Diese Modellvorstellung wurde für ein konzeptionelles Modell umgesetzt. Ein Modell, das konzeptionelle, physikalisch begründete Parameter verwendet, erlaubt, dass der Modellierer seine Vorstellung von den Abhängigkeiten des Parameters in die Parameterschätzung einfließen lassen kann (= Hypothese). In der vorgestellten Untersuchung konnten nur einige wenige Hypothesen überprüft werden. Die Überprüfung von vielen möglichen Hypothesen ist wünschenswert.

## 5. Ergebnisse der Elementarflächen-Kalibrierung

Die Möglichkeiten dieser Art von Parametrisierung und Kalibrierung wurde anhand des Einzugsgebietes in einer Untersuchung für den Wasserverband Eifel-Rur (HYDROTEC, 2010) überprüft. Die Inde mit einem Einzugsgebiet von ca. 360 km<sup>2</sup> entspringt in der Eifel und mündet in die Rur.

Die Übereinstimmung mit Messungen wurde mit einer Langzeitsimulation über 13 Jahre mit 5-Minuten-Zeitschritt geprüft. Kriterien waren Ganglinien und Stichproben partieller Serien sowie die Prüfung anhand von Karten berechneter Parameterkennwerte.

Das Untersuchungsgebiet weist eine besondere Konstellation auf. Die Historie der Modellierung seit den 1980er Jahren beinhaltet u. a., dass ursprünglich nur Messwerte für den Pegel Platenhammer (ca. 76 km<sup>2</sup>) vorlagen, an dem auch kalibriert wurde. Die Messwerte des Pegels Mulartshütte (ca. 45 km<sup>2</sup>) wurden in den 1990er Jahren aufbereitet. Sie gingen in die

ursprüngliche Kalibrierung nicht ein. Damit ergab sich die Möglichkeit zur Validierung der ursprünglichen Kalibrierung.

Die im Gewässerverlauf der Vicht (NG der Inde ) aufeinanderfolgenden Pegel Mulartshütte und Platenhammer liegen laut Feuchtekarte in sehr unterschiedlichen Bereichen. Das Einzugsgebiet des Pegels Mulartshütte hat größere Anteile an feuchten Flächen, während das Gebiet zwischen Mulartshütte und Platenhammer größere Anteile an trockenen Flächen hat (Abbildung 6).

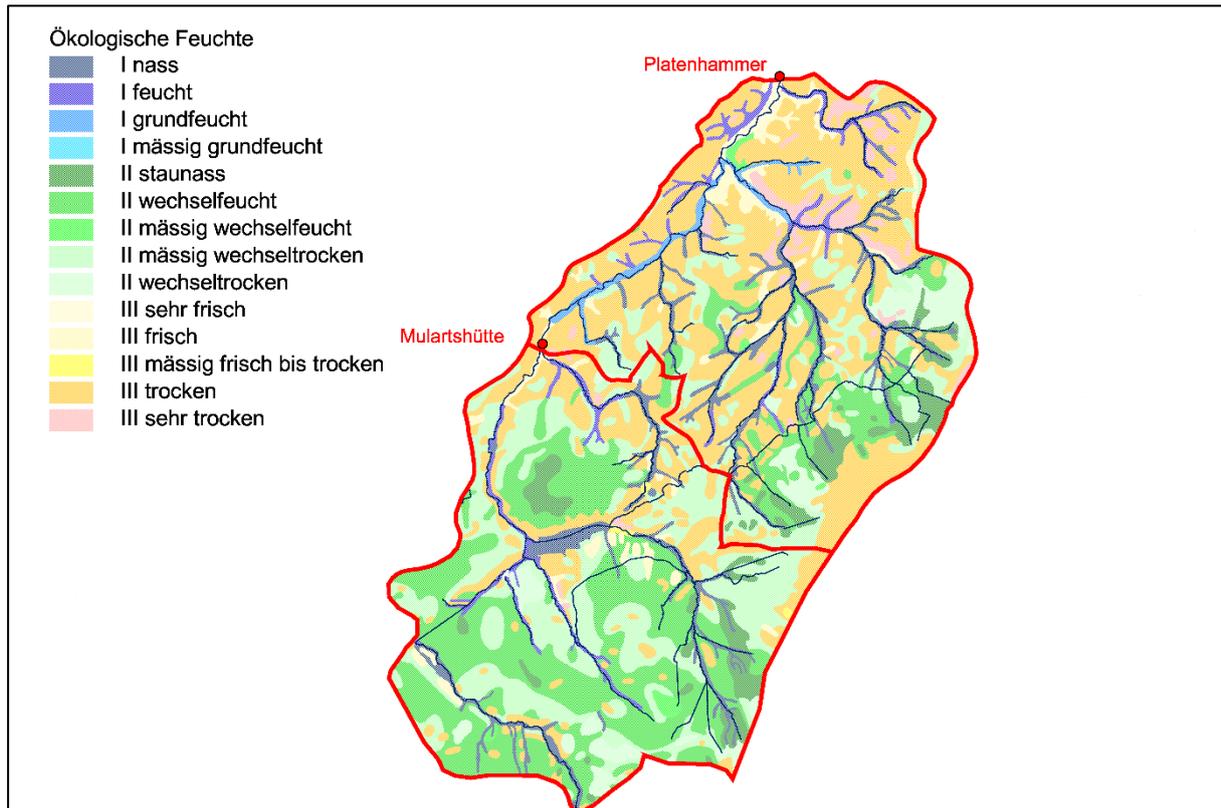


Abb. 6: Feuchteverteilung im Einzugsgebiet der Vicht (NG der Inde)

Die Abflussbildung des Modells nach Elementarflächenkalibrierung zeigt verstärkte Bildung von Oberflächenabfluss für das Gebiet bis Mulartshütte und geringere Bildung von Oberflächenabfluss für den Abschnitt zwischen Mulartshütte und Platenhammer (Abbildung 7).

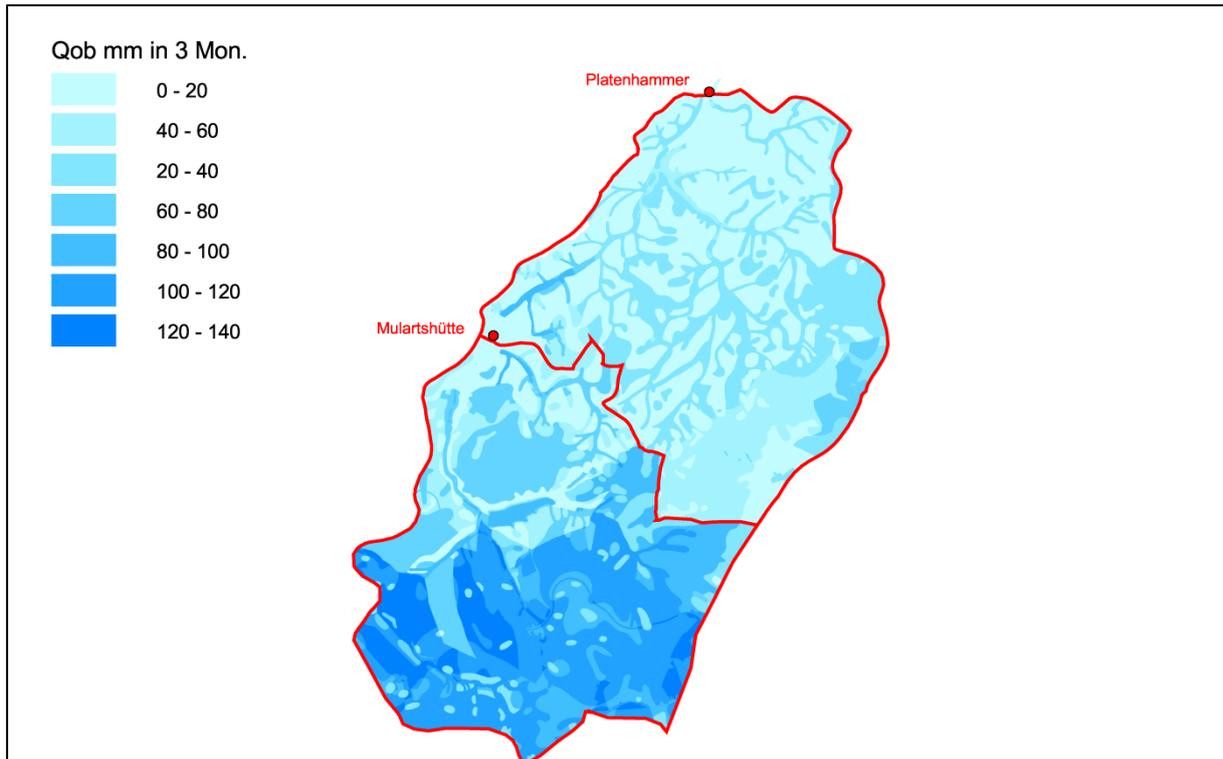


Abb. 7: Abflussbildung des Modells nach Elementarflächenkalibrierung

Beim Pegelvergleich mit Ganglinien sind die Unterschiede gegenüber konventioneller Kalibrierung beim Pegel Platenhammer weniger auffällig. Die konventionelle Kalibrierung gleicht räumliche Überschätzung/Unterschätzung der Abflussbildung offensichtlich über größere Flächeneinheiten aus (Abbildung 8).

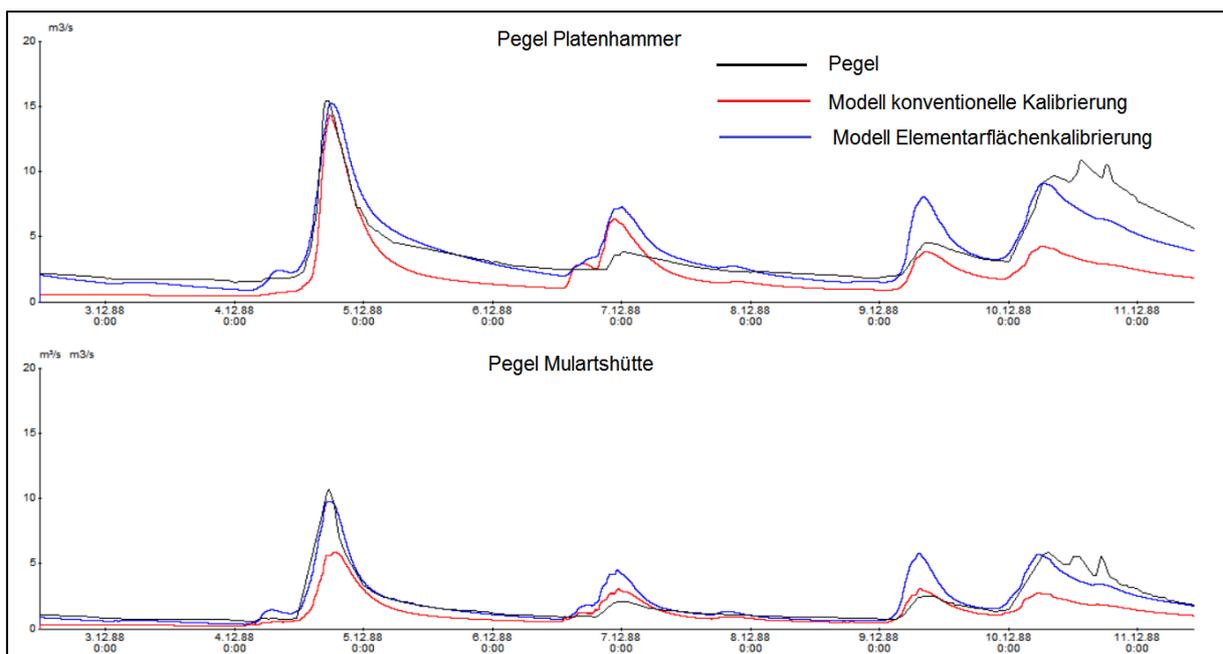


Abb. 8: Ganglinienvergleich Ereignis Dezember 1988.

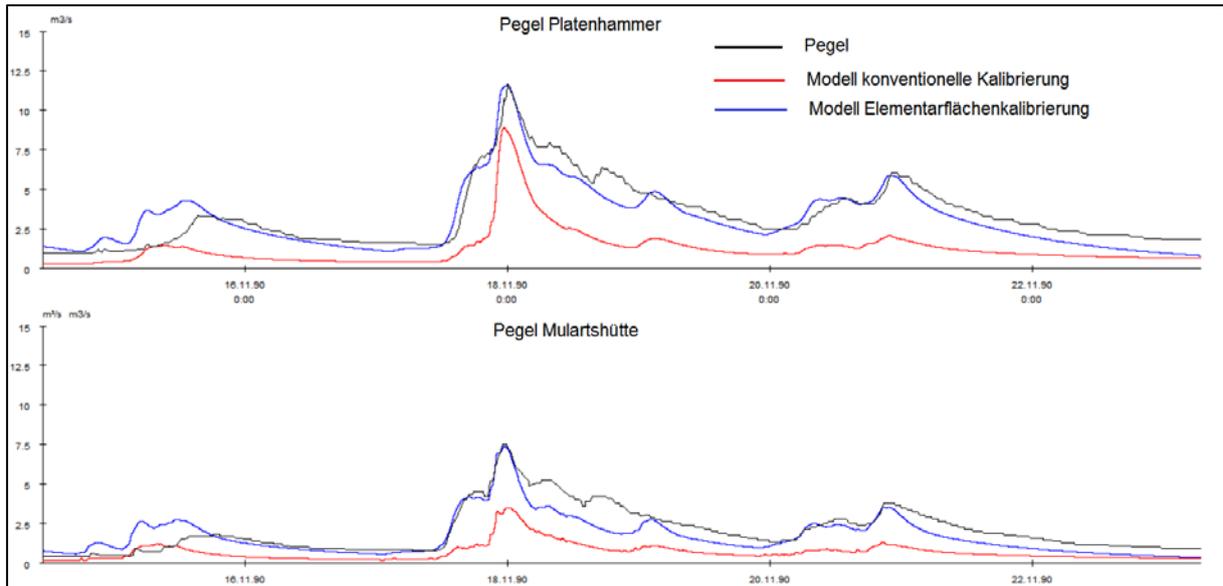


Abb. 9: Ganglinienvergleich Ereignis November 1990.

Insgesamt ist zu erkennen, dass die Elementarflächenkalibrierung für eine Erhöhung der Scheitelwerte in Mulartshütte sorgt, während die Scheitelwerte am Pegel Platenhammer unverändert blieben bzw. besser mit der Messung übereinstimmen (Abbildung 9).

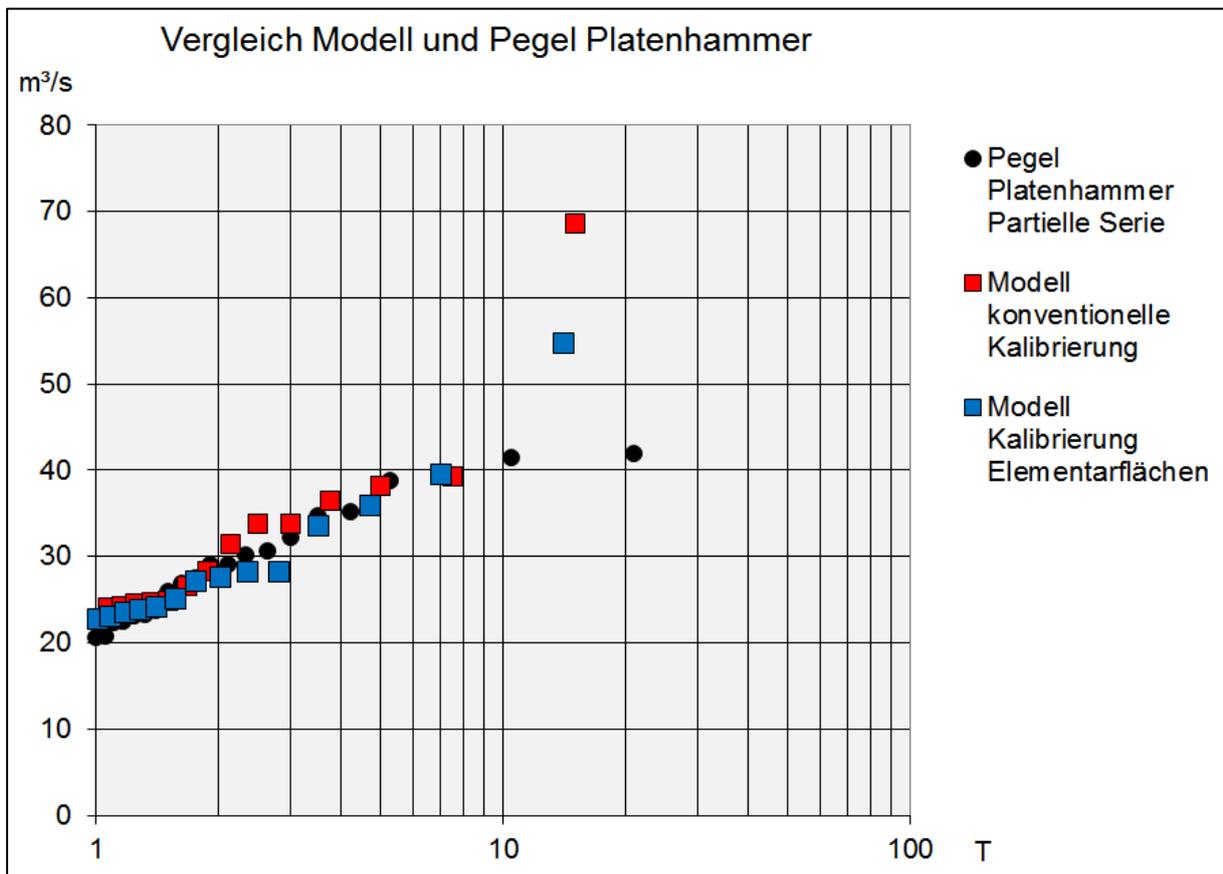


Abb. 10: Vergleich von Messwerten und Modellergebnissen als partielle Serienwerte am Pegel Platenhammer

Der Vergleich von Messwerten und Modellergebnissen als partielle Serienwerte am Pegel Platenhammer zeigt, dass das Modell am Pegel Platenhammer sowohl für die ursprüngliche Kalibrierung als auch die Elementarflächenkalibrierung passende Übereinstimmung liefert (Abbildung 10).

Die Gegenüberstellung mit den nachträglich zur Verfügung stehenden Daten am Pegel Mulartshütte in Form partieller Serienwerte zeigt eine Unterschätzung durch das Modell bei der konventionellen Kalibrierung (Abbildung 11).

Offensichtlich haben die Parameterschätzung mit Infiltrationsraten anhand relativ homogener Böden und die pauschalen Eichfaktoren über das gesamte Pegelgebiet dafür gesorgt, dass die Abflussbildung für den Pegel Mulartshütte im feuchten Gelände unterschätzt wurde und im trockenen Zwischeneinzugsgebiet bis zum Pegel Platenhammer überschätzt wurde, so dass insgesamt die Abflüsse am unteren Pegel passend simuliert wurden.

Die feuchteabhängige Parameterschätzung und selektive Kalibrierung hat dafür gesorgt, dass die Abflussbildung in beiden Abschnitten zutreffend ist und auch im Pegelabschnitt Mulartshütte passende Modellergebnisse berechnet werden. Die Abflussbildung innerhalb des Einzugsgebiets hat sich vollständig geändert. Der bereits für Einzelereignisse kalibrierte Modelldatensatz konnte so für eine Langzeitsimulation verbessert werden.

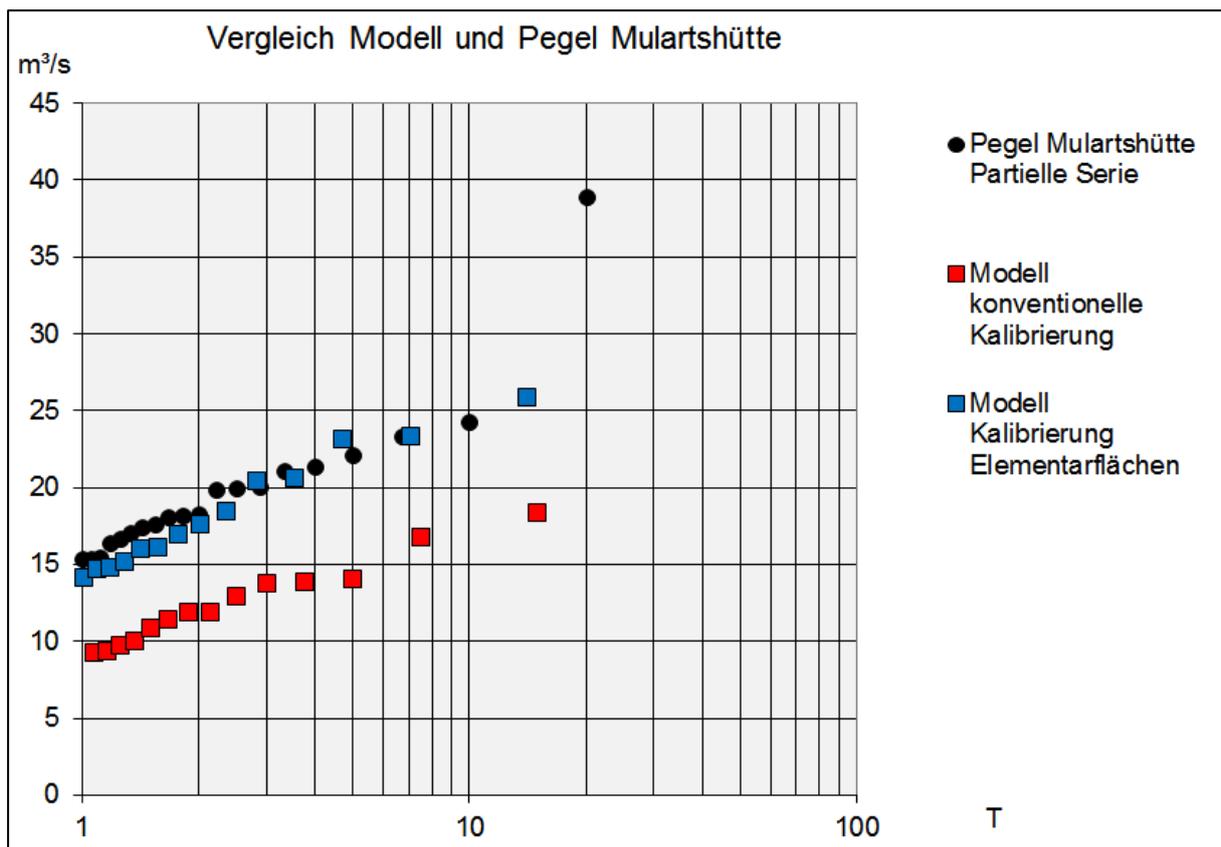


Abb. 11: Vergleich von Messwerten und Modellergebnissen als partielle Serienwerte am Pegel Mulartshütte

## 6. Fazit

Es wurden erweiterte Grundlagendaten verwendet, die es heute bereits gibt. Das Verfahren erlaubt auch die Einbindung ggf. zukünftig vorliegender Datenbestände.

Die Denkweise eines konzeptionellen Modells wurde erweitert, der konzeptionelle Ansatz bleibt bestehen. Generell sollte eine Übertragbarkeit auf andere konzeptionelle Modelle möglich sein. Für das NA-Modell NASIM sind keine Modellerweiterungen erforderlich.

Beliebige konzeptionell gedachte Parameter können berücksichtigt werden, damit ist das Konzept auch bei zusätzlich verwendeten Eigenschaften oder zusätzlichen Modellparametern erweiterbar. Die prozessorientierte Parameterschätzung ist nachvollziehbar.

Die Bearbeitung von Massendaten ist durch Verwendung von Scriptsprachen (Python) und Verwendung von Schnittstellen (XML) möglich.

Die Kalibrierung erfolgt gebietsübergreifend und eigenschaftsabhängig. Der Erkenntnisgewinn kann auf Kalibrierungen anderer Einzugsgebiete übertragen werden. Dies führt zu größerer Homogenität und Vergleichbarkeit von Modelldatensätzen. Die Kalibrierung erfolgt durch Aufstellung, Variation oder Iteration von Hypothesen über den Zusammenhang von Eigenschaften kleinster räumlicher Einheiten und Prozessraten. Bei der Kalibrierung sind selektive Anpassungen möglich.

Die Anwendung des Verfahrens ergab eine Verbesserung der Übereinstimmung von Ganglinien und Abflussscheitelwerten. Die Abflussbildung ist räumlich differenzierter, Abflussbildungsschwerpunkte unterscheiden sich von denen bisher verwendeter Parameterschätzverfahren. überschätzte Abflussscheitelwerte aus konventioneller Kalibrierung konnten reduziert werden. Die aufgestellten Hypothesen können als Karte visualisiert und überprüft werden.

Es gibt viele Freiheitsgrade, die viele Möglichkeiten für Modellierer bieten. Damit ist ein gewisses Risiko verbunden, so dass die Anwendung des Verfahrens bisher nur für erfahrene Modellierer zu empfehlen ist. Eine seriöse Überprüfung vieler Hypothesen ist erforderlich. Daraus sind Empfehlungen sinnvoller Hypothesen für die praktische Arbeit abzuleiten.

Die Erarbeitung einer prozessorientierten Abbildungsphilosophie ist nötig. Zu klären ist, welche Parameterkonstellationen bestimmte Prozesse im Modell aktivieren bzw. umgehen. Die mögliche Dominanz bestimmter Eigenschaften auf die Parameterschätzung ist zu untersuchen. Ebenso sind Dominanzwechsel, Schwellen, kritische Werte bisher nicht untersucht.

## Literatur

HOLTAN, H. N. et.al. (1969): Hydrologic capacities of soils in watershed ingeneering. Proc. International Hydrologic Symposium, Ft. Collins

HYDROTEC (2010): Projektbericht: Modellertüchtigung Langzeitsimulation und potenziell naturnaher Zustand für das N-A-Modell Inde/Vicht, im Auftrag des Wasserverbandes Eifel-Rur, Aachen

MENDEL, H.-G. (2000): Elemente des Wasserkreislaufs, Eine kommentierte Bibliographie zur Abflussbildung, Berlin

WOHLRAB, B., ERNSTBERGER, H., MEUSER, A., SOKOLLEK, V. (1992): Landschaftswasserhaushalt, Hamburg



## **Berücksichtigung räumlich differenzierter Abflussprozesskarten im Wasserhaushaltsmodell LARSIM**

Ingo Haag, Annette Luce, Nicole Henn, Norbert Demuth

### **Zusammenfassung**

Unter Beibehaltung der grundlegenden Modellstruktur wurde das Bodenmodul des Wasserhaushaltsmodells LARSIM so weiterentwickelt, dass flächendifferenzierte Informationen zu den bei der Hochwasserentstehung dominierenden Abflussprozessen im Modell explizit berücksichtigt werden können. Für das Einzugsgebiet der Nahe wurde ein entsprechendes Modell unter Nutzung der vorhandenen bodenhydrologischen Karte aufgebaut, kalibriert und validiert. Das Modell zeigt gute Ergebnisse an den Pegeln und bildet die zu erwartenden räumlichen Unterschiede bei der Hochwasserentstehung adäquat ab. Es hat sich auch im operationellen Betrieb des Hochwassernachrichtendienstes Rheinland-Pfalz bewährt, wo es seit 2014 erfolgreich zur Hoch- und Niedrigwasservorhersage sowie zur Hochwasserfrühwarnung eingesetzt wird.

### **1. Einleitung**

In den letzten Jahren wurden große Fortschritte bei der Identifikation und Kartierung der bei Hochwasser dominanten Abflussentstehungsprozesse erzielt. Daher ist es wünschenswert, die resultierenden flächendifferenzierten Informationen zur Verbesserung von Hochwasservorhersagemodellen zu nutzen. Insbesondere sollte es durch die Integration von Abflussprozesskarten in ein Modell möglich werden, die räumliche Verteilung der (Hochwasser-) Abflüsse innerhalb von Einzugsgebieten besser abzubilden. Um die aus der Abflussprozesskartierung resultierenden räumlich differenzierten Informationen für die mesoskalige Hochwasservorhersage nutzen zu können, müssen diese Informationen daher in fachlich geeigneter Weise in die Hochwasservorhersagemodelle integriert werden. Primäres Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, das Wasserhaushaltsmodell LARSIM so anzupassen und zu erweitern, dass die Informationen aus Abflussprozesskarten im Modell direkt und quantitativ genutzt werden können. Im vorliegenden Beitrag werden zum einen die theoretischen Grundlagen und die modelltechnischen Anpassungen an LARSIM erläutert. Zum anderen werden Ergebnisse für das Wasserhaushaltsmodell des Nahe-Einzugsgebiets vorgestellt, in dem der neue Ansatz erstmals in der operationellen Hochwasservorhersage zum Einsatz kommt.

### **2. Grundlagen**

#### **2.1 Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM**

Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) wurde von BREMICKER (2000) entwickelt. Mit LARSIM Wasserhaushaltsmodellen (LARSIM-WHM) kann der terrestrische Wasserkreislauf prozessorientiert und flächendifferenziert in variabler zeitlicher Auflösung simuliert werden. LARSIM-WHM für einzelne Flussgebiete basieren auf flächendetaillierten Systemdaten zu Geländehöhe, Landnutzung, Boden, Gerinne etc. Die Modelle werden in raster- oder einzugsgebietsbezogene Teilgebiete unterteilt, die über das Gewässernetz miteinander verbunden sind. Die Teilgebiete werden wiederum in hydrologisch ähnliche Landnutzungs-Boden-Kompartimente differenziert.

Der Modellantrieb erfolgt über meteorologische Daten (Niederschlag, Lufttemperatur etc.), die optional extern oder modellintern regionalisiert und korrigiert werden können. Auf Grund-

lage von Gebiets- und Antriebsdaten werden Interzeption, Schneedynamik, Evapotranspiration und Abflussbildung (mit Infiltration, Bodenwasserhaushalt und Tiefenversickerung) spezifisch für die Landnutzungs-Boden-Kompartimente berechnet. Die Simulation der Abflusskonzentration erfolgt darauf aufbauend teilgebietsspezifisch. Für den so in die Gewässer transferierten Abfluss werden die Translation und Retention im Gerinne, die Wirkung von Seen, Talsperren oder Rückhaltebecken sowie von Ein-, Aus- und Überleitungen berücksichtigt (BREMICKER 2000).

In den letzten 15 Jahren wurde LARSIM-WHM insbesondere für den Einsatz in der Hochwasservorhersage aber auch für andere Anwendungen wie die Optimierung von Speicherabgaben, die Niedrigwasservorhersage oder die Simulation und Vorhersage von Wassertemperaturen kontinuierlich fortentwickelt (z. B. LUCE et al., 2006, HAAG & LUCE 2008, BREMICKER & VARGA 2014). Räumlich hoch aufgelöste LARSIM-WHM werden nahezu flächendeckend in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz und im Saarland sowie in Nordrhein-Westfalen, der Schweiz, Luxemburg, Vorarlberg, Tirol und den französischen Regionen Elsass und Lothringen operationell eingesetzt. Die grundsätzliche Weiterentwicklung des Modells wird durch eine Entwicklergemeinschaft der Hochwasserzentralen aus Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz und der Schweiz abgestimmt und koordiniert (BREMICKER et al., 2013).

## **2.2 Räumlich differenzierte Abflussprozesskarten**

Die bei der Hochwasserentstehung dominierenden Abflussprozesse, die in der hier vorgestellten Weiterentwicklung von LARSIM-WHM berücksichtigt werden können, lehnen sich eng an die Abflussprozessstypen nach SCHERRER (1997) an. Die einzelnen Abflussprozessstypen sind durch eine charakteristische Abflussreaktion gekennzeichnet, welche bei intensiven, ergiebigen Niederschlägen dominiert. Dabei ist zu beachten, dass auf Flächen mit einem dominanten Abflussprozessstyp auch andere Abflussreaktionen auftreten, die im Falle intensiver, ergiebiger Niederschläge jedoch von geringerer Bedeutung sind. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Abflussreaktion in erster Linie durch die Abflussbildung geprägt wird, aber auch Konzentrationsprozesse (Fließweg bis zum Vorfluter) eine Rolle spielen (vgl. LUWG 2006, 2010b, SCHERRER & NAEF 2003).

Die insgesamt 9 zu berücksichtigenden Abflussprozessstypen mit ihren charakteristischen Abflussreaktionen sind in Tabelle 1 kurz beschrieben. Der Typ charakterisiert dabei die Geschwindigkeit und Intensität der jeweiligen Abflussreaktion. Typ 1 steht somit für eine sehr schnelle und intensive Abflussreaktion, wohingegen Typ 5 eine sehr stark verzögerte und retardierte Abflussreaktion kennzeichnet.

Aus der Ermittlung der jeweils dominierenden Abflussprozesse kann eine entsprechende Abflussprozesskarte abgeleitet werden, deren flächenhaften Informationen in LARSIM genutzt werden sollen. Die im vorliegenden Fall verfügbare Abflussprozesskarte für die Nahe basiert auf dem Bestimmungsschlüssel nach Scherrer (LUWG 2006) und einer Übertragung auf die Fläche mithilfe eines bodenkundlichen, expertengestützten Verfahrens unter Nutzung von Reliefdaten und Data Mining (LUWG 2010a). Die hieraus abgeleitete und im vorliegenden Fall genutzte Karte ist in Abbildung 1 dargestellt.

Tab. 1: In LARSIM zu berücksichtigende Abflussprozessstypen.

Kürzel	Typ	Beschreibung der dominanten Abflussreaktion
HOF	1	Oberflächenabfluss durch Infiltrationshemmnisse oder geringe Infiltrationskapazität
SOF1	1	Oberflächenabfluss durch rasche Sättigung der Fläche
SOF2	2	Verzögerter Oberflächenabfluss durch Sättigung der Fläche
SOF3	3	Stark verzögerter Oberflächenabfluss durch langsame Sättigung der Fläche
SSF1	2	Präferentieller lateraler Abfluss im Boden ohne Verzögerung
SSF2	3	Präferentieller lateraler Abfluss im Boden mit Verzögerung
SSF3	4	Präferentieller lateraler Abfluss im Boden mit starker Verzögerung
DP	5	Dominierende Tiefenversickerung ohne rasche Abflussreaktion
Moor	5	Nicht beitragende Flächen ohne Tiefenversickerung (Feuchtfelder ohne Neigung)

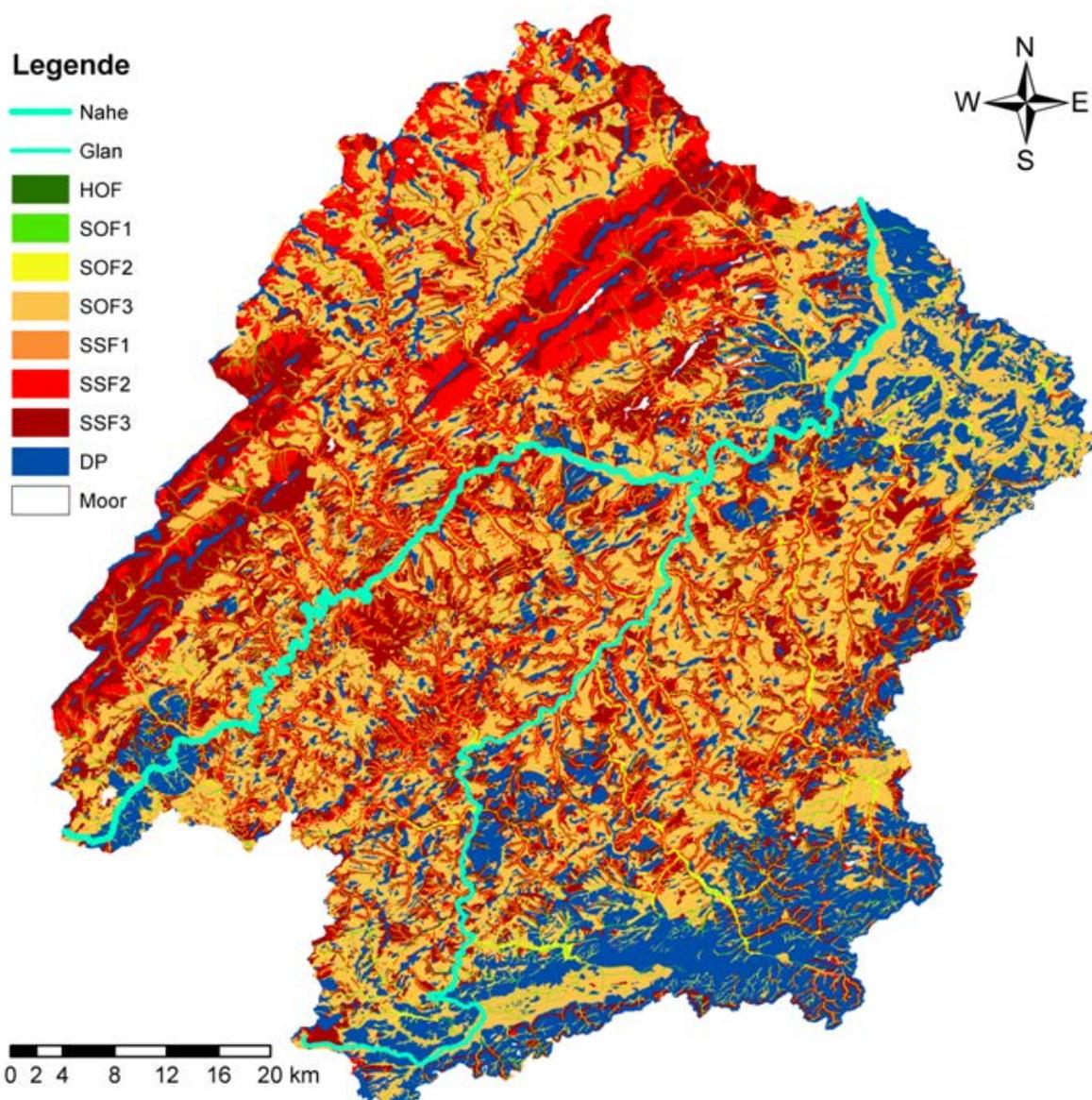


Abb. 1: Abflussprozesskarte für das Naheeingangsgebiet (Datengrundlage: LUWG 2010a).

### 3. Modellentwicklung

#### 3.1 Grundsätzliche Funktionsweise des angepassten Bodenmoduls

Die für die Hochwasserentstehung maßgeblichen Prozesse der Abflussbildung und deren Verknüpfung mit der Abflusskonzentration werden in LARSIM in erster Linie über das Bodenmodul gesteuert. LARSIM bietet bereits die Möglichkeit, je nach Datenlage und Anforderungen an das Modell unterschiedliche Bodenmodule zu nutzen, die alle auf dem sogenannten Xinanjiang-Ansatz basieren (ZHAO & LIU 1995). Mit keinem der bisher in LARSIM verfügbaren Bodenmodule kann die unterschiedliche Wirkung der bei Hochwasser dominierenden Abflussprozesse jedoch adäquat differenziert werden. Deshalb wurde das LARSIM-Bodenmodul so weiterentwickelt, dass die konzeptionelle Vorstellung und die Wirkung der unterschiedlichen Abflussprozesse damit differenziert werden kann. Dabei wurde die grundsätzliche Modelstruktur beibehalten sowie auf die Kompatibilität zu den im Anschluss an die Abflussbildung simulierten Prozessen und die verfügbaren Datengrundlagen geachtet. Daher basiert auch das für die Nutzung von Abflussprozesskarten neu entwickelte Bodenmodul im Grundsatz auf dem Xinanjiang-Ansatz (Abbildung 2).

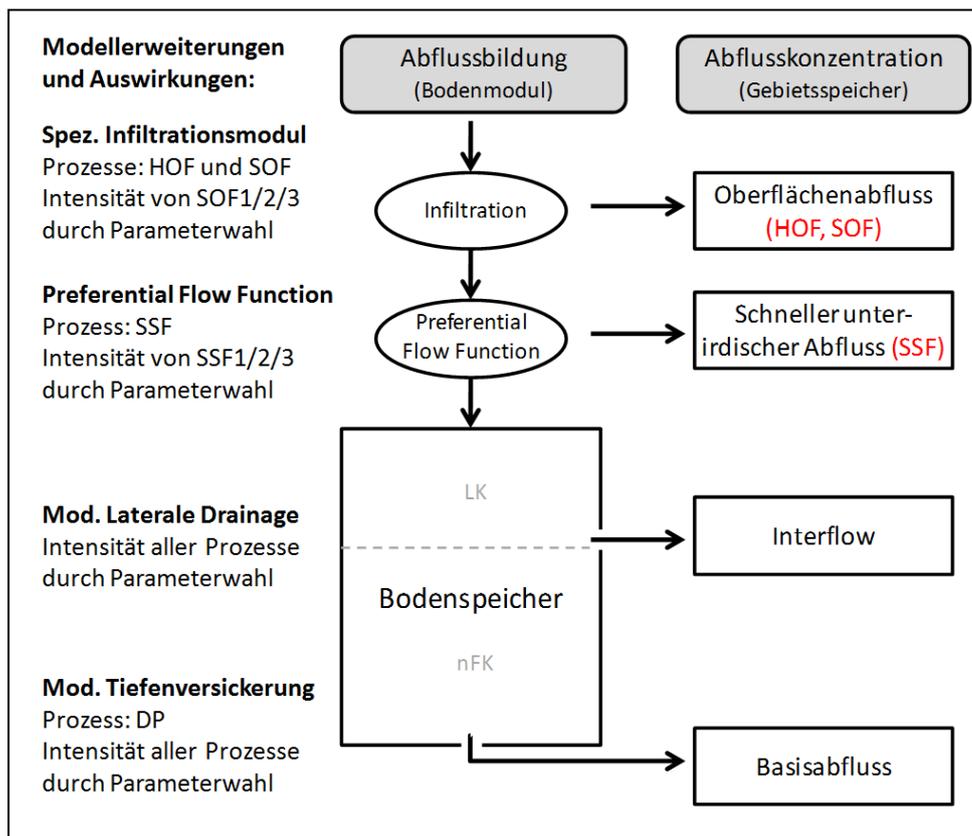


Abb. 2: Schema des LARSIM Bodenmoduls zur Nutzung von Abflussprozesskarten sowie hierfür speziell entwickelte oder angepasste Bausteine und deren Auswirkungen (links).

Wichtig für die Weiterentwicklung ist es zunächst, dass innerhalb der LARSIM TGB Landnutzungs-Boden-Prozess-Kompartimente ausgewiesen werden, indem Boden- und Landnutzungsdaten sowie die digitale Abflussprozesskarte miteinander verschnitten werden. Innerhalb der LARSIM Teilgebiete (z. B. 1 km<sup>2</sup>-Raster oder hydrologische Teil-Einzugsgebiete) können somit Interzeption, Schneedynamik, Evapotranspiration und Abflussbildung für jedes

dieser als Hydrological-Response-Units (HRU) fungierenden Kompartimente separat mit einem eigenen Bodenmodul simuliert werden. Das optional (beim Vorliegen von Abflussprozesskarten) nutzbare neue Bodenmodul enthält ein speziell für die Fragestellung entwickeltes Infiltrationsmodul und eine Preferential Flow Function. Zudem wurde die modelltechnische Abbildung der lateralen Drainage zum Interflowspeicher und der vertikalen Drainage (Tiefenversickerung) zum Basisabflussspeicher angepasst (Abbildung 2). Die einzelnen Module und ihre Wirkungsweise werden in den nachfolgenden Unterkapiteln 3.2 bis 3.4 beschrieben. Darüber hinaus wurde ein spezielles Modul für die Abbildung von nicht beitragenden Flächen ohne Tiefenversickerung (Moore) entwickelt. Da diese Flächen im Nahegebiet jedoch von untergeordneter Bedeutung sind, wird für dessen Darstellung auf LUWG (2010b) verwiesen.

### 3.2 Infiltrationsmodul

Um sowohl Horton-Oberflächenabfluss infolge von Infiltrationshemnissen wie auch Oberflächenabfluss auf Sättigungsflächen abbilden zu können, wird die aktuelle Infiltrationskapazität als Funktion der maximalen Infiltrationsrate  $I_{\max}$  (bei trockenem Boden), der minimalen Infiltrationsrate  $I_{\min}$  (bei gesättigtem Boden) und der aktuellen relativen Füllung des Bodenspeichers  $W_{\text{akt}}/W_{\text{max}}$  ausgedrückt. Dabei wird die Form der Abnahme der Infiltrationskapazität mit zunehmender Bodensättigung über den Exponenten  $\text{binf}$  gesteuert:

$$I_{\text{kap}} = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot \left(1 - \frac{W_{\text{akt}}}{W_{\text{max}}}\right)^{\text{binf}}$$

Die 3 Parameter des Infiltrationsmoduls  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  und  $\text{binf}$ , erlauben es, das Infiltrationsverhalten des Bodens äußerst flexibel abzubilden. Flächen mit HOF können dabei mit einer generell geringen Infiltrationskapazität (geringer Wert für  $I_{\max}$ ) abgebildet werden. SOF unterschiedlicher Intensität kann über eine geringe minimale Infiltrationsrate und die unterschiedlich rasche Abnahme der Infiltrationskapazität mit zunehmender Bodenfeuchte ( $\text{binf}$ ) abgebildet werden. Das für die Plot-Skale typischer Weise beobachtete Infiltrationsverhalten kann mit dem Modellansatz gut nachgebildet werden (LUWG 2010b).

Das Infiltrationsmodul ist somit der einzige Filter, der Oberflächenabfluss produziert. Da davon auszugehen ist, dass die Konzentration von Oberflächenabfluss unabhängig vom Bildungsprozess ist, wird der gesamte gebildete Oberflächenabfluss über einen Gebietsspeicher für HOF und SOF abgeführt (vgl. Abbildung 2). Für alle Flächen, auf denen weder HOF noch SOF in nennenswerter Menge auftreten soll (SSF, DP), kann dies über hohe Werte für  $I_{\max}$  und  $I_{\min}$  sowie durch einen geringen Wert für  $\text{binf}$  gewährleistet werden.

### 3.3 Preferential Flow Function

Das nicht über das Infiltrationsmodul als Oberflächenabfluss ausgeschiedene Wasserdargebot infiltriert zunächst in den Boden. Dort kann es entweder die Matrix auffüllen, vertikal versickern oder über präferentielle unterirdische Fließwege rasch lateral abgeführt werden und somit als SSF zur Hochwasserbildung beitragen. Die Aktivierung präferentieller unterirdischer Fließwege wie z.B. Sättigungsbereiche oberhalb stauender Horizonte bzw. Schichten oder laterale Makroporen steht im Zusammenhang mit der zunehmenden Sättigung der Bodenmatrix. Dabei können unterschiedliche Prozesse maßgeblich sein, die in komplexer Wei-

se wirken können (z. B. DEMUTH & HILTPOLT 1993). Folglich bietet sich für das Bodenmodul eines mesoskaligen Hochwasservorhersagemodells ein empirisch statistischer Ansatz an, um die mit steigendem Bodenwassergehalt zunehmende Aktivierung präferentieller lateraler Fließwege abzubilden. Der schnelle unterirdische Abfluss SSF wird daher mit demselben mathematischen Ansatz abgebildet wie der Direktabfluss im ARNO- oder VIC-Modellansatz (vgl. BREMICKER 2000, BEVEN 2012). Dabei ist der SSF eine Funktion des infiltrierten Wassers  $Inf$ , des maximalen und des relativen aktuellen Bodenwassergehalts sowie eines empirischen Exponenten  $bpff$ :

$$SSF = Inf - (W_{akt} - W_{max}) + W_{max} \cdot \left( \left( 1 - \frac{W_{akt}}{W_{max}} \right)^{\frac{1}{bpff+1}} - \left( \frac{Inf}{(bpff + 1) \cdot W_{max}} \right) \right)^{bpff+1}$$

Über die Wahl des Exponenten  $bpff$  kann die Abgabe des Bodenspeichers zum Gebietspeicher für schnellen unterirdischen Abfluss gesteuert werden, über den die Abflusskonzentration des SSF berechnet wird.

### 3.4 Exponentielle Tiefenversickerung und laterale Drainage

Die hydraulische Leitfähigkeit ungesättigter Böden ist im Bereich der Mittelporen (nFK) gering und nimmt mit Sättigung der Grobporen (Luftkapazität, LK) exponentiell zu (JURY & HORTON 2004). Unter stationären Bedingungen kann somit davon ausgegangen werden, dass auch die Tiefenversickerung mit Füllung der Grobporen überproportional zunimmt. Um dieses Verhalten abzubilden, wird die vertikale Drainage  $Q_{vert}$  als Funktion des aktuellen Wassergehalts im Bodenspeicher  $W_{akt}$ , des maximalen Wassergehalts  $W_{max}$  und der nFK ( $W_{nfk}$ ) ausgedrückt:

$$\begin{aligned} \text{für } W_{akt} > W_{nfk}: \quad Q_{vert} &= \beta \left( 1 + (f_{\beta} - 1) \left( \frac{W_{akt} - W_{nfk}}{W_{max} - W_{nfk}} \right) \right) W_{akt} \frac{\Delta t}{24} \\ \text{für } W_{akt} \leq W_{nfk}: \quad Q_{vert} &= \beta W_{akt} \frac{\Delta t}{24} \end{aligned}$$

Der lineare Drainageindex  $\beta$  bildet die Tiefenversickerung im Mittelporenbereich (nFK) ab, während der Faktor  $f_{\beta}$  für die überproportionale Zunahme der Versickerung im Grobporenbereich verantwortlich ist (vgl. Abbildung 3). Dadurch können z.B. DP-Flächen mithilfe einer im Grobporenbereich stark zunehmenden Tiefenversickerung (hoher Wert für  $f_{\beta}$ ) abgebildet werden.

Wie für die vertikale Drainage geschildert, ist auch für die laterale Drainage zum Gebietspeicher für Interflow eine exponentielle Zunahme mit zunehmender Füllung der Grobporen zu erwarten. Daher wurde für diese laterale Drainage ein analoger Faktor für die exponentielle Zunahme  $f_{int}$  eingeführt, der in gleicher Weise auf die laterale Drainage wirkt wie  $f_{\beta}$  auf die vertikale Drainage.

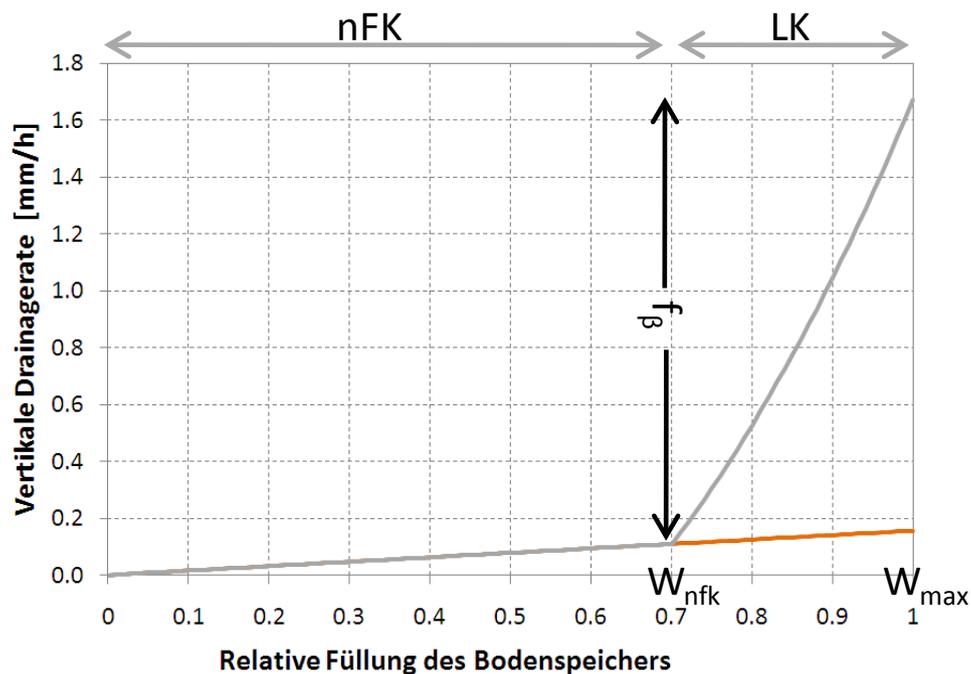


Abb. 3: Abhängigkeit der vertikalen Drainagerate von der Bodenspeicherfüllung und Wirkung des Faktors für die exponentielle Tiefenversickerung  $f_{\beta}$ .

### 3.5 Grundparametrisierung und charakteristische Abflussreaktion

Das oben kurz dargestellte Bodenmodul ermöglicht es, über die Parameterwahl die Abflussreaktion auf einen intensiven, ergiebigen Niederschlag gezielt zu steuern. Dies wurde genutzt, um für jeden dominanten Abflussprozesstyp mithilfe numerischer Experimente eine Grundparametrisierung des Bodenmoduls festzulegen, mit der die dem Prozesstyp zugehörige Abflussreaktion erzeugt wird. Mit der so festgelegten Grundparametrisierung werden die in Abbildung 4 dargestellten Abflussreaktionen erzeugt. Diese entsprechen den gemäß LUWG (2006) für die einzelnen Abflussprozesstypen zu erwartenden charakteristischen Reaktionen.

Je nachdem welcher dominante Abflussprozesstyp auf einem HRU vorliegt, wird ihm die zugehörige Grundparametrisierung des Bodenspeichers zugeordnet. Ein unkalibriertes Modell spiegelt somit bereits die auf Grundlage der bodenhydrologischen Karte zu erwartenden räumlichen Unterschiede der Abflussreaktionen wider. Um eine Kalibrierung zu ermöglichen, kann die jeweilige Grundparametrisierung über einfache Multiplikationsfaktoren angepasst werden. Die Skalierfaktoren wirken dabei in gleicher Weise auf alle Abflussprozesstypen und ermöglichen somit eine Kalibrierung unter Beibehaltung der räumlichen Unterschiede.

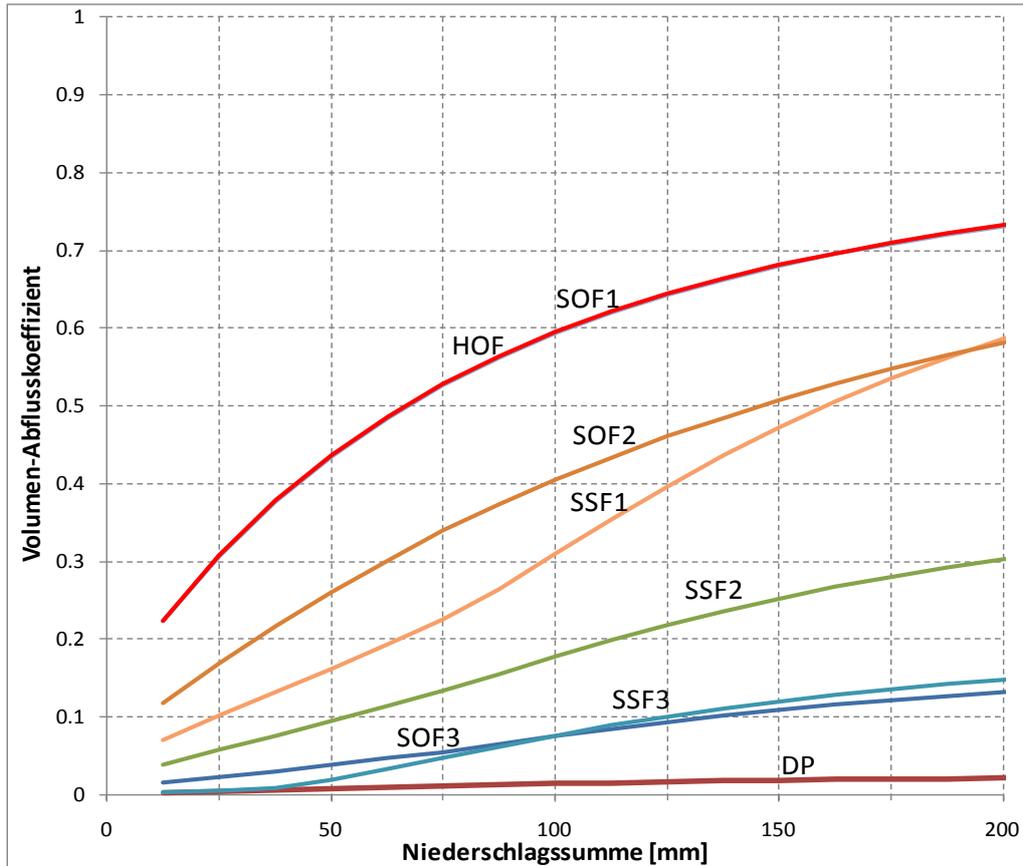


Abb. 4: Mit der Grundparametrisierung für die einzelnen Abflussprozessstypen erzielte Abflussreaktionen.

## 4. Operationelles LARSIM Wasserhaushaltsmodell für die Nahe

### 4.1 Modellaufbau und Kalibrierung

Das ca. 4 000 km<sup>2</sup> große Nahe-Einzugsgebiet liegt zwischen 80 und 816 m ü. NN. Die Jahresdurchschnittstemperaturen innerhalb des Gebiets reichen von 7,5°C im Hunsrück bis zu 12,5°C im Mündungsbereich, die durchschnittlichen Jahresniederschläge liegen zwischen 450 mm und 1 400 mm. Zudem variieren Petrographie und Böden im Gebiet stark. Aus diesen Faktoren resultiert eine klar ausgeprägte räumliche Differenzierung der Abflussprozessstypen, was sich in der bodenhydrologischen Karte des Gebiets widerspiegelt (Abbildung 1). Die in der bodenhydrologischen Karte flächendifferenziert abgebildeten dominanten Abflussprozesse wurden am Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (früher LUWG) in ein bestehendes LARSIM-WHM für die Nahe integriert. Hierzu wurde die bodenhydrologische Karte mit den LARSIM Teilgebieten sowie mit Landnutzungs- und Bodenkarten verschnitten. Hierdurch konnten flächendifferenziert für jedes Teilgebiet mehrere Landnutzungs-Boden-Prozess-Kompartimente (HRU) in der LARSIM-Gebietsdatei ausgewiesen werden (Abbildung 5). Diese spezifischen HRU wurden mit der oben beschriebenen Grundparametrisierung verknüpft, so dass ein unkalibriertes LARSIM-WHM zur Verfügung stand, in dem die auf Grundlage der bodenhydrologischen Karte zu erwartenden räumlichen Unterschiede der Abflussreaktionen enthalten sind.

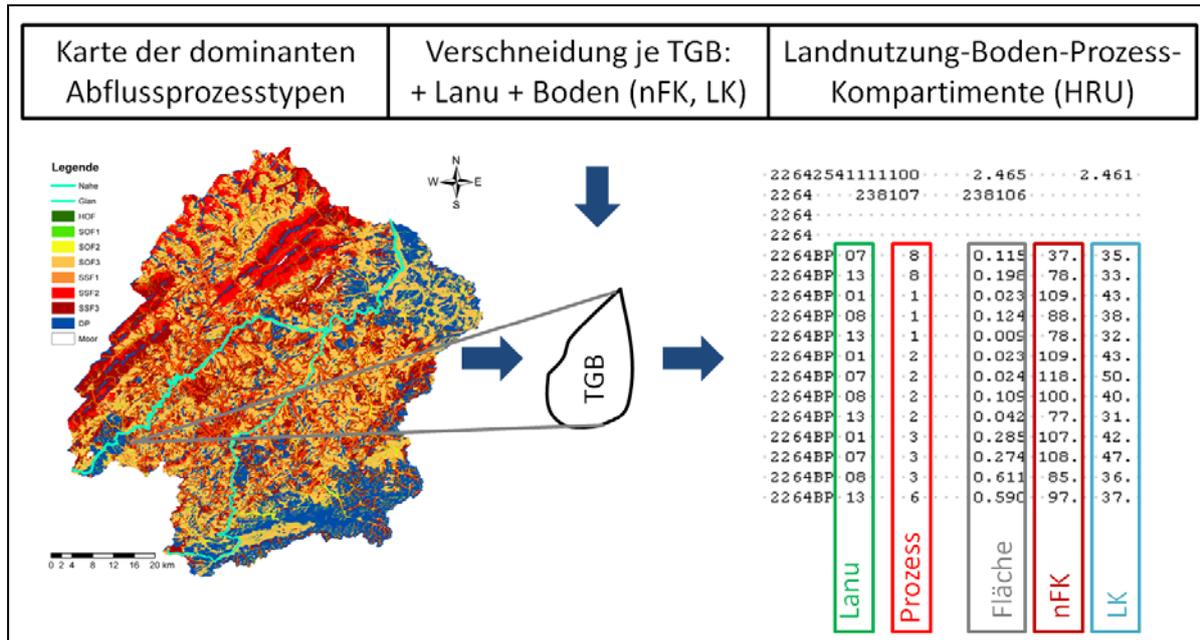


Abb. 5: Schematisches Vorgehen bei der Ermittlung der Landnutzungs-Boden-Prozess-Kompartimente (HRU) für die Gebietsdatei des LARSIM-WHM für die Nahe.

Dieses WHM wurde für 24 Pegel unter Verwendung des Zeitraums 1994 – 2013 kalibriert. Die Kalibrierung umfasste die Anpassung der oben erläuterten Skalierfaktoren für das Bodenmodul und die Anpassung der hiervon unabhängigen Parameter für die Abflusskonzentration und den Wellenablauf im Gerinne (LUWG 2013). Die in der bodenhydrologischen Karte enthaltene räumliche Differenzierung der Abflussreaktionen bleibt somit trotz Kalibrierung erhalten. Mit der Kalibrierung konnten die Ergebnisse an den Pegeln im Vergleich zum bislang vorliegenden Modell (ohne Berücksichtigung der Abflussprozesskarte) verbessert werden. Die Qualität der Simulationsergebnisse liegt im für vergleichbare Gebiete üblichen Bereich. Je nach Pegel liegen die Nash-Sutcliffe-Effizienzen zumeist zwischen ca. 0,8 und 0,95 (LUWG 2013).

#### 4.2 Verbesserte räumliche Differenzierung

Die Wirkung der Berücksichtigung der Abflussprozesskarte im LARSIM-Modell wird anhand der Pegelbezugsgebiete von Nohfelden an der Nahe und Abentheuer am Traunbach dargestellt. Beide Einzugsgebiete liegen in unmittelbarer Nachbarschaft im oberen Naheeingzugsgebiet. Sie weisen jedoch stark unterschiedliche Charakteristika auf. Das Einzugsgebiet des Pegels Abentheuer wird von SSF3-, SSF2- und DP-Flächen dominiert. Die schnelleren und intensiver reagierenden SOF-Prozesse sowie SSF1 spielen nur eine untergeordnete Rolle. Im Gegensatz hierzu dominieren im Einzugsgebiet von Nohfelden die SOF-Prozesse auf einem wesentlich größeren Flächenanteil (Abbildung 6 links oben). Die unterschiedlichen Einzugsgebietscharakteristika zeigen auch die erwartete Wirkung auf die Hochwasserabflussspenden, was anhand des großräumigen, extremen Hochwassers vom Dezember 1993 verdeutlicht wird. Während in Nohfelden gemessene Abflussspenden von über 1 400 l/s/km<sup>2</sup> erreicht werden, liegen die gemessenen Maxima am Pegel Abentheuer nur bei 350 l/s/km<sup>2</sup> (Abbildung 6 rechts oben).

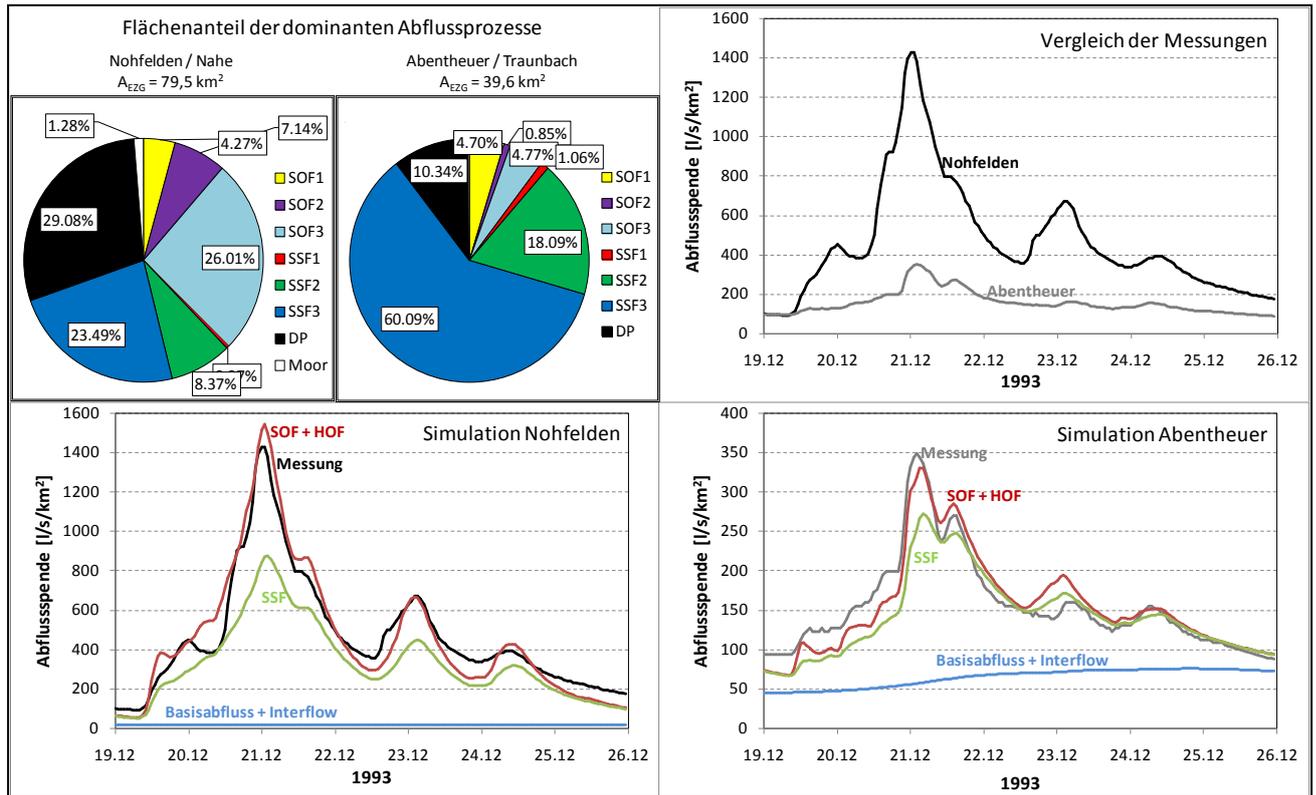


Abb. 6: Charakteristika der benachbarten Pegelinzugsgebiete Nohfelden und Abentheuer sowie gemessene und simulierte Abflüsse für das Hochwasser 1993.

Für beide Pegel werden Verlauf und Scheitel des Hochwassers durch das Modell gut abgebildet. Bei Nohfelden wird der Scheitelabfluss gemäß der Modellergebnisse in etwa je zur Hälfte durch SSF- und durch SOF-Abflusskomponenten gebildet (Abbildung 6 links unten). Im Gegensatz hierzu wird der viel kleinere Scheitel am Pegel Abentheuer zu etwa 85% durch SSF-Prozesse hervorgerufen. Oberflächenabfluss spielt hier nur eine untergeordnete Rolle. Im Einzugsgebiet von Abentheuer wird die Reaktion auf das Hochwasser offenkundig auch durch verstärkte laterale Drainage und Tiefenversickerung abgepuffert, was zu einer Zunahme des simulierten Interflow- und Basisabflussanteils führt (Abbildung 6 rechts unten). Die Auswertungen verdeutlichen somit, dass die unterschiedlichen Charakteristika der beiden Einzugsgebiete durch das Modell gut erfasst werden und die zu erwartenden Unterschiede der Abflussreaktionen adäquat abgebildet werden können.

#### 4.3 Operationeller Betrieb

Das weiterentwickelte LARSIM-Wasserhaushaltsmodell für das Naheinzugsgebiet wird seit 2014 erfolgreich im automatisierten operationellen Modellbetrieb des Hochwassernachrichtendienstes Rheinland-Pfalz eingesetzt (<http://www.hochwasser-rlp.de>). Es liefert zuverlässige Vorhersagen, die neben der Hochwasservorhersage auch der Hochwasserfrühwarnung und der Niedrigwasservorhersage dienen. Bei dem in Rheinland-Pfalz eingesetzten LARSIM-Modell für das Naheinzugsgebiet handelt es sich somit unseres Wissens um das erste operationelle Hochwasservorhersagemodell, in dem die Informationen aus einer Abflussprozesskarte explizit genutzt werden.

## 5. Diskussion und Schlussfolgerungen

Hauptziel der vorliegenden Arbeit war es, LARSIM konzeptionell so weiterzuentwickeln, dass die flächendifferenzierten Informationen aus Abflussprozesskarten bestmöglich berücksichtigt werden können. CASPER et al., (2015) haben gezeigt, dass es auch im bisherigen Modellkonzept grundsätzlich möglich ist, Abflussprozesskarten zur prozessorientierten flächendifferenzierten Parameterwahl des Bodenmoduls zu nutzen. Dieses Vorgehen wurde jedoch dadurch erschwert, dass das bisherige Modellkonzept nur bedingt geeignet war, die dominanten Abflussprozesse klar zu differenzieren (LUWG 2010b, GRONZ 2013). Diese wichtige Einschränkung konnte durch die hier vorgestellten Weiterentwicklungen aufgehoben werden. Oberflächenabfluss (HOF und SOF) kann nun mithilfe eines neu integrierten und sehr flexiblen Infiltrationsmoduls ausgeschieden werden. Präferentieller lateraler Hochwasserabfluss im Boden (SSF) wird über einen statistischen Ansatz als Funktion der Bodenfeuchte ermittelt. Flächen mit dominierender Tiefenversickerung, ohne merkbare Abflussreaktion bei Hochwasser (DP) können durch eine Erweiterung der Ansätze für die vertikale und laterale Drainage aus dem Bodenspeicher adäquat abgebildet werden.

Zudem können die Informationen aus Abflussprozesskarten nun in ihrer tatsächlichen Flächendifferenzierung direkt in der Gebietsdatei von LARSIM quantitativ berücksichtigt werden. Für jeden dort hinterlegten Abflussprozessstyp wird eine Grundparametrisierung vorgenommen, durch die eine für den jeweiligen dominanten Prozessstypen charakteristische Abflussreaktion erreicht wird. Diese Grundparametrisierung kann über Skalierfaktoren modifiziert werden, um eine bestmögliche Anpassung an die gemessenen Abflüsse am Pegel zu erreichen, wobei jedoch die räumlich verteilten Unterschiede in der Abflussreaktion beibehalten werden.

Unter Nutzung der beim Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz vorliegenden bodenhydrologischen Karte (Abflussprozesskarte) wurde ein solches prozessorientiertes LARSIM WHM für das Einzugsgebiet der Nahe erfolgreich aufgestellt, kalibriert und validiert. Das unter Berücksichtigung der Abflussprozesskarte weiterentwickelte LARSIM-WHM für die Nahe wird seit 2014 vom Hochwassernachrichtendienst in Rheinland-Pfalz erfolgreich zur operationellen Hochwasservorhersage und -frühwarnung eingesetzt.

Mit dem Modell können zum einen die gemessenen Abflüsse an den Pegeln gut abgebildet und vorhergesagt werden. Zum anderen werden die räumlichen Unterschiede zwischen den Einzugsgebieten und innerhalb der Einzugsgebiete so abgebildet, wie man dies auf Grundlage der Abflussprozesskarte erwartet. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass mit dem angepassten LARSIM-Modellansatz die dominanten Abflussprozesse räumlich differenziert integriert werden können und die räumliche Heterogenität der Hochwasserentstehung wesentlich besser abgebildet werden kann. Somit werden auch verlässlichere Aussagen über die räumliche Verteilung der Hochwasserabflüsse innerhalb von Pegel-einzugsgebieten möglich.

## Literatur

- BEVEN, K. (2012): Rainfall—Runoff Modelling: The Primer. 2<sup>nd</sup> Edition: S. 1-457. Wiley-Blackwell. Chichester.
- BREMICKER, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11.

- BREMICKER, M., BRAHMER, G., DEMUTH, N., HOLLE, F.-K. & HAAG, I. (2013): Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und weitere Anwendungen. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 2013/6(9): 509-514.
- BREMICKER, M. & VARGA, D. (2014): Kommunikation der Verlässlichkeit von Hochwasserfrühwarnung und Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 58(2): 76 – 83.
- CASPER, M. C., GRONZ, O. & GEMMAR, P. (2015): Prozesstreue Parametrisierung und Kalibrierung eines Wasserhaushaltsmodells, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 59.2015 H.4: 136-144.
- DEMUTH, N. & HILTPOLT, A. (1993): „Preferential flow“: Eine Übersicht über den heutigen Kenntnisstand. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 156: 479-484.
- GRONZ, O. (2013): Nutzung von Abflussprozessinformationen in LARSIM. Dissertation, Universität Trier.
- HAAG, I. & LUCE, A. (2008): LARSIM-WT: an integrated water-balance and heat-balance model to simulate and predict stream water temperatures. *Hydrological Processes* 22: 1046-1056.
- JURY, W. A. & HORTON, R. (2004): *Soil Physics*. 6<sup>th</sup> Edition: S. 1-384. Wiley. New York.
- LUCE, A., HAAG, I., BREMICKER, M. (2006): Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen zur kontinuierlichen Abflussvorhersage in Baden-Württemberg. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50(2): 58 – 66.
- LUWG (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Scherrer AG im Auftrag des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz. Bericht 18/2006 des LUWG.
- LUWG (2010a): Bodenhydrologische Karte Nahe / Rheinland-Pfalz Südwest. Soilution GbR im Auftrag des LUWG, Bericht 6/2010 des LUWG.
- LUWG (2010b): Integration des Abflusspotenzials in das LARSIM-Bodenmodul mit erweiterten Parametern. HYDRON Ingenieurgesellschaft im Auftrag des LUWG (unveröffentlicht).
- LUWG (2013): Kalibrierung des LARSIM Wasserhaushaltsmodells mit erweitertem Boden- und Infiltrationsmodul für das Einzugsgebiet der Nahe. HYDRON Ingenieurgesellschaft im Auftrag des LUWG (unveröffentlicht).
- 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., NAEF, F. (2003): A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. *Hydrological Processes*, 17: 391-401.
- ZHAO, R. J. & LIU, X-R. (1995): The Xinanjiang Model. In Singh, V. P. (ed.), *Computer Models Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado: 215-232.

## Überprüfung eines prozessnahen Abflussbildungsmoduls auf der Hangskale und in klein- und mesoskaligen Gebieten

Manuel Antonetti, Simon Scherrer, Peter Kienzler, Michael Margreth, Massimiliano Zappa

### Zusammenfassung

Eine prozessnahe Routine für das konzeptionelle, räumlich verteilte, hydrologische Modell PREVAH wurde entworfen, welche aus einem Bodenwasserspeicher, einem Linearspeichersystem für die Abflussbildung und einem Basisabflussspeicher besteht. Die Innovation liegt in der Verwendung von Abflusstypenkarten und in der Sub-Parametrisierung der Abflussbildungsprozesse, indem jedem Abflusstyp ein entsprechendes Linearspeichersystem zugeordnet wird. Das Modell wird durch kontinuierliche PREVAH-Simulationen initialisiert, indem die Bodenfeuchte eingelesen und in Abhängigkeit von den verschiedenen Abflusstypen umverteilt wird. Beregnungsversuche wurden nachgerechnet, bei welchen die Abflussprozesse von kleinen homogenen Flächen bei klar definierten künstlichen Niederschlägen unterschiedlicher Intensität untersucht wurden. Das ermöglichte es, optimierte Modellparameterbereiche a priori festzulegen. Das neue Modell wurde in zwei kleinskaligen Einzugsgebieten in den Schweizer Voralpen sowie in zwei mesoskaligen Einzugsgebieten im Schweizer Mittelland getestet und mit dem traditionellen PREVAH verglichen.

Das neue Modell zeigte eine gegenüber dem traditionellen PREVAH vergleichbare Leistung in der Kalibrierungsperiode, während der gemessene Abfluss in der Validierungsperiode besser simuliert werden konnte. Zudem gab das neue Modell eine realistischere Verteilung der Prozesse auf den Einzugsgebieten wieder.

### 1. Einführung

Die gegenwärtigen Module zur Beschreibung der Abflussbildung in konzeptionellen hydrologischen Modellen sind stark auf Kalibrierungen angewiesen. Denn sie simulieren den Abfluss in Einzugsgebieten ohne Messungen meist nicht mit der erforderlichen Genauigkeit.

Flüsse und Bäche können in der Tat sehr unterschiedlich auf Starkniederschlag reagieren. Auf manchen Böden infiltriert Regen kaum und fließt rasch ab, auf anderen Böden jedoch kann der gesamte Regen infiltrieren und wird entweder gespeichert oder gelangt auf unterirdischen Fließwegen mehr oder weniger verzögert zum Abfluss. Entscheidende Faktoren sind das Infiltrationsvermögen und die Speicherfähigkeit der Böden im Einzugsgebiet.

In den letzten Jahren wurden deutliche Fortschritte hinsichtlich des Prozessverständnisses erzielt. Basierend auf Beregnungsversuchen (SCHERRER 1997; KIENZLER 2007) wurden Kriterien festgelegt, unter welchen Standorteigenschaften welcher Abflussprozess zu erwarten ist (SCHERRER & NAEF 2003). Darauf aufbauend wurde ein Bestimmungsschlüssel für die Kartierung hochwasserrelevanter Flächen entwickelt (SCHERRER AG 2006). Welche Abflussprozesse an einem Standort auftreten und welcher davon dominiert, hängt von der Mächtigkeit, Struktur und Oberfläche des Bodens, vom geologischen Untergrund, von der Topographie, der Landnutzung und dem Niederschlag ab (SCHERRER & NAEF 2003). Die Prozesse, welche eine ähnliche Reaktion auslösen, werden in sogenannte Abflusstypen zusammengefasst (Tabelle 1).

Tab. 1: Übersicht der verschiedenen Abflussbildungsprozesse und deren Aufteilung in Abflusstypen (AT). Verändert nach NAEF et al., (2000).

Fließweg	Prozessgruppe	Abk.	Intensität des Abflussprozess	AT
Oberfläche	Hortonscher Oberflächenabfluss	HOF1	Sofortiger Oberflächenabfluss als Folge von Infiltrationshemmnissen	1
		HOF2	Leicht verzögerter Oberflächenabfluss als Folge von Infiltrationshemmnissen	1
	Gesättigter Oberflächenabfluss	SOF1	Sofortiger Oberflächenabfluss als Folge sich schnell sättigender Flächen	1
		SOF2	Verzögerter Oberflächenabfluss als Folge sich sättigender Flächen	2
		SOF3	Stark verzögerter Oberflächenabfluss als Folge sich langsam sättigender Flächen	4
	Unterirdisch	Laterale Fließprozesse im Boden	SSF1	Sofortiger Abfluss im Boden
SSF2			Verzögerter Abfluss im Boden	3
SSF3			Stark verzögerter Abfluss im Boden	4
Tiefensickerung		DP	Tiefensickerung ins Grundwasser	5

Ziel dieser Studie ist es zu untersuchen, wie die Verwendung von räumlich verteilten Prozessinformationen aus sogenannten Abflusstypenkarten (ATK) zur Reduzierung des Kalibrierungsbedarfs und somit zur Verminderung der Unsicherheit hydrologischer Simulationen dienen kann. Insbesondere für die Vorhersage bzw. Abschätzung von Extremereignissen ist diese Vorgehensweise sehr vielversprechend. Für die Verwirklichung dieses Konzeptes wurde ein prozessnahe Abflussbildungsmodul entwickelt, welches von „grossräumigen“ PREVAH-Simulationen aktiviert und initialisiert wird und welches lokale Gewitterhochwasser mit höherer räumlicher und zeitlicher Auflösung zu simulieren imstande ist.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Studie wie folgt dargestellt. In Kapitel 2 wird auf die Strategie zur Anwendung von ATK in PREVAH eingegangen. Kapitel 3 beschreibt die Parametrisierung des prozessnahen Moduls anhand von Berechnungsversuchen, während in Kapitel 4 beide Modelle – das traditionelle PREVAH und das neue prozessnahe Abflussmodul - in vier Einzugsgebieten verschiedener Grösse getestet werden. In Kapitel 5 werden die Schlussfolgerungen gezogen.

## 2. Das prozessnahe Abflussbildungsmodul

Abbildung 1 zeigt die angewandte Strategie zur Integration von Prozessinformation in PREVAH mittels der Entwicklung eines prozessbasierten Abflussbildungsmoduls. Um die Verwendung räumlich verteilter meteorologischer Daten der Meteoschweiz („CombiPrecip-Produkt“, SIDERIS et al., 2014) und Abflusstypenkarten als Inputdaten für das Modell zu ermöglichen, wurde eine gegitterte Diskretisierung mit einer Auflösung von 500 m verwendet.

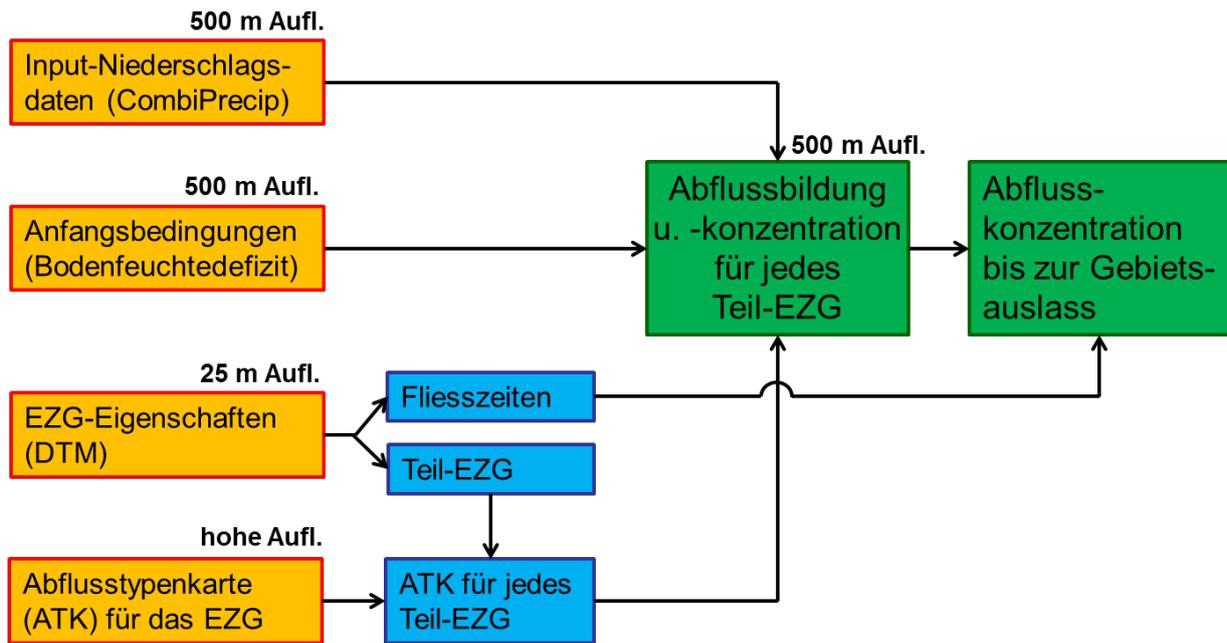


Abb. 1: Das Flussdiagramm stellt die verfolgte Strategie zur Integration von Prozessinformation im hydrologischen Modell dar.

Aus einem Höhenmodell (DTM) wird das gesamte Untersuchungsgebiet in verschiedene, bis zu 0.5 km<sup>2</sup> grosse **Teil-EZG** unterteilt. Für jeden Auslass der berechneten Teil-EZG wird eine charakteristische **Fließzeit** in den Gerinnen bis zum Gebietsauslass mit dem TANA-LYS-Tool (SCHULLA 1997) berechnet. Die **Abflussbildung** und die **Abflusskonzentration** auf der Landoberfläche bis zum Teilgebietsauslass werden somit gekoppelt berechnet. Das Routing im Gerinne bis zum Gebietsauslass erfolgt danach separat anhand eines Linear-speicher-Ansatzes.

In einer sog. „DRP-Matrix“ (Tabelle 2) werden die Anteile der Abflusstypen jeder Zelle zu 500x500 Meter-grossen Zellen zusammengefasst. Dazu wurde ein Werkzeug programmiert, das die DRP-Matrix aus einer hoch aufgelösten Abflusstypenkarte erzeugt (Details zum DRP-Konzept in MÜLLER et al., 2009 und in SCHMOCKER-FACKEL et al., 2007). Dieses Verfahren ermöglicht einen vernünftigen Rechenaufwand und vermeidet gleichzeitig Informationsverluste durch die Gitterauflösung.

Tab. 2: Eine sogenannte „DRP-Matrix“ soll für jede Zelle Auskunft über die Anteile der Abflusstypen geben.

Zelle	Abflusstyp 1 [%]	Abflusstyp 2 [%]	Abflusstyp 3 [%]	Abflusstyp 4 [%]	Abflusstyp 5 [%]
1	5	0	50	30	15
2	0	17	3	55	25
...					
n	0	2	60	20	18

Abbildung 2a zeigt die gegenwärtige, konzeptionelle Struktur des Abflussbildungsmoduls von PREVAH (VIVIROLI et al., 2009a). In den Bodenwasserspeicher (SSM) und in das Linear-speichersystem für die Abflussbildung (SUZ) gehen der Bestandesniederschlag  $P_b$  [mm/h]

und, falls vorhanden, das Schmelzwasser der Schneedecke ein. Ein Exponentialparameter CBETA teilt die Anteile des Bestandesniederschlags zwischen den beiden Speichern auf.

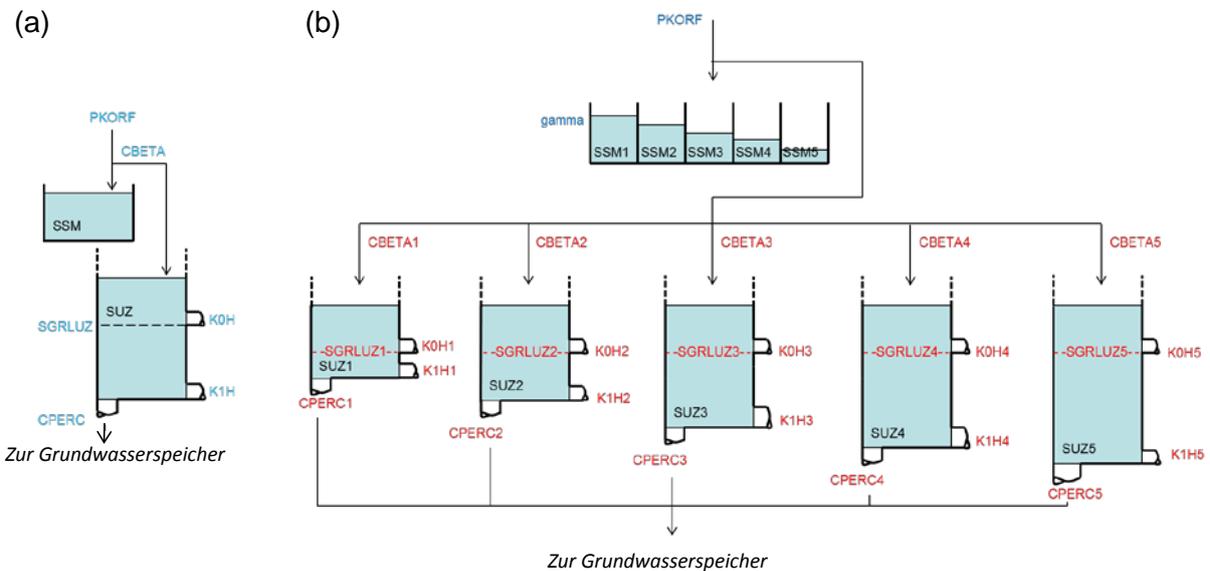


Abb. 2: (a) Das traditionelle Abflussbildungsmodul von PREVAH. Verändert nach VIVIROLI et al., (2009a); (b) Das prozessbasierte Abflussbildungsmodul. Rote bzw. blaue Beschriftungen beziehen sich auf abflusstyp- bzw. zellenbezogene Parameter.

Der Ausgang des Bodenfeuchtespeichers SSM führt in den Abflussspeicher SUZ. Von diesem gehen zwei Ausgänge raus, einerseits der schnelle Oberflächenabfluss und andererseits der verzögerte Zwischenabfluss im Boden. Diese zwei Auslässe werden durch zwei Speicherkonstanten KOH bzw. K1H gesteuert, während ein Speichergrenzwert SGRLUZ zur Aktivierung des oberirdischen Abflusses dient. Zudem führt eine Versickerungskomponente mit einer maximalen Intensität CPERC in die unteren Grundwasserspeicher, welche verschiedene Grundwasserkomponenten bezeichnen. Abflussbildung, Abflusskonzentration und Routing werden gekoppelt berechnet. Dies verunmöglicht zuverlässige Simulationen mit dem traditionellen PREVAH in ungemessene Gebiete, da die Speicherkonstanten stark von EZG-Eigenschaften wie z.B. Gebietsgröße oder Gerinnetichte abhängen.

Für das prozessbasierte Abflussbildungsmodul wurde - in Anlehnung an die traditionelle Struktur von PREVAH - eine Modellstruktur entworfen, die aus einem Bodenwasserspeicher (Abbildung 2b, oberste Speichergruppe), einem Linearspeichersystem für die Abflussbildung (Abbildung 2b, untere Speichergruppe) und einem Grundwasserspeicher besteht. Die Innovation liegt in der Sub-Parametrisierung der Abflussprozesse, indem jedem Abflussbildungstyp ein entsprechendes Linearspeichersystem für jede Zelle zugeordnet wird. Ausgehend von der Annahme, dass schnell beitragende Flächen einen höheren Sättigungsgrad als langsam beitragende Flächen aufweisen, wurde die Bodenfeuchte um einen Faktor „gamma“ zwischen den verschiedenen Abflusstypen verteilt.

### 3. Modellparametrisierung

Eine wichtige Voraussetzung für die Übertragbarkeit des Modells in ungemessene Gebiete besteht darin, dass die Parameter für die Sättigung und Entwässerung der Speicher apriori

so festgelegt werden, dass sie eine möglichst hohe Allgemeingültigkeit haben und somit auf möglichst viele Landschaften, Böden und Gesteinsformationen unverändert übertragen werden können. Die Innovation des prozessnahen Abflussbildungsmodul liegt deshalb in der „a priori“ Festlegung von Parameterintervallen: Wertebereiche für den Infiltrationsparameter CBETA sowie für den Speichergrenzwert des oberirdischen Abflusses SGRLUZ können in Abhängigkeit von Prozesstyp bzw. -intensität „a priori“ bestimmt werden. Dies gilt auch für die Speicherkonstanten des oberirdischen Abflusses K0H und des unterirdischen Abflusses K1H sowie für die maximale Perkolationsintensität CPERC. Die Parameterbereiche werden so bestimmt, dass die Abflussreaktion der HOF-, SOF-, SSF- und DP-Flächen möglichst genau und allgemein gültig berechnet werden kann. Zu diesem Zweck wurden ausgewählte Berechnungsversuche nachgerechnet, die zur Untersuchung der Abflussprozesse auf kleinen homogenen, ca. 60 – 120 m<sup>2</sup> grossen Flächen mit klar definierten künstlichen Niederschlägen unterschiedlicher Intensität von SCHERRER (1997) und KIENZLER (2007) durchgeführt wurden (Tabelle 3).

Tab. 3: Übersicht über die Berechnungsversuche mit Angaben zum Standort (Ls = Landschaft, VA = Voralpen, OG = Oberrheingraben, ML = Mittelland; DRP = „Dominant Runoff Process“, dominanter Abflussbildungsprozess; RT = „Runoff Type“, Abflusstyp; SOF = „Saturation Overland Flow“, gesättigter Oberflächenabfluss; SSF = „Subsurface Flow“, Fliessprozess im Boden; DP = „Deep percolation“, Tiefensickerung). Verändert nach SCHERRER (1997) und KIENZLER (2007).

Berechnungsversuch	Ls.	Bodenform	Ausgangsmaterial	Vegetation, Nutzung	Neigung	DRP (RT)
Bilten	VA	Hanggley	Nagelfluh und Bergsturzmaterial	lichter Erlen- und Fichten-Jungwald	31%	SOF1 (1)
Therwil (Nachversuch)	OG	sandige Braunerde	Sandstein	extensive Weidenutzung	23%	SOF2 (2)
Willerzell-Hang (2x)	VA	sandige Braunerde	Sandstein	extensive Weidenutzung	55%	SSF2 (3)
Therwil	OG	sandige Braunerde	Sandstein	extensive Weidenutzung	23%	SOF3 (4)
Reiden	ML	Braunerde	Sandstein	Weide	40%	DP (5)

Ausgehend von der Annahme, dass auf jeder Berechnungsfläche nur ein dominanter Abflussbildungsprozess auftritt, wurden die Parameterbereiche jedes Abflusstyps anhand von einer Montecarlo-Simulation mit 10000 Läufen eingegrenzt. Zu diesem Zweck wurde eine 1D-Version des prozessnahen Moduls mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten verwendet. Abbildung 3 stellt die Ergebnisse dieser Optimierungsdurchläufe dar. Es ist nicht überraschend, dass mit zunehmender Breite des optimierten Wertebereiches die Sensitivität der Parameter abnimmt. Im Fall vom Abflusstyp 5 (Tiefensickerung) sind beispielsweise die

Speicherkonstanten nicht sensitiv, da dieser Abflusstyp so definiert ist, dass das Wasser ausschliesslich in die unteren Grundwasserspeicher fliesst.

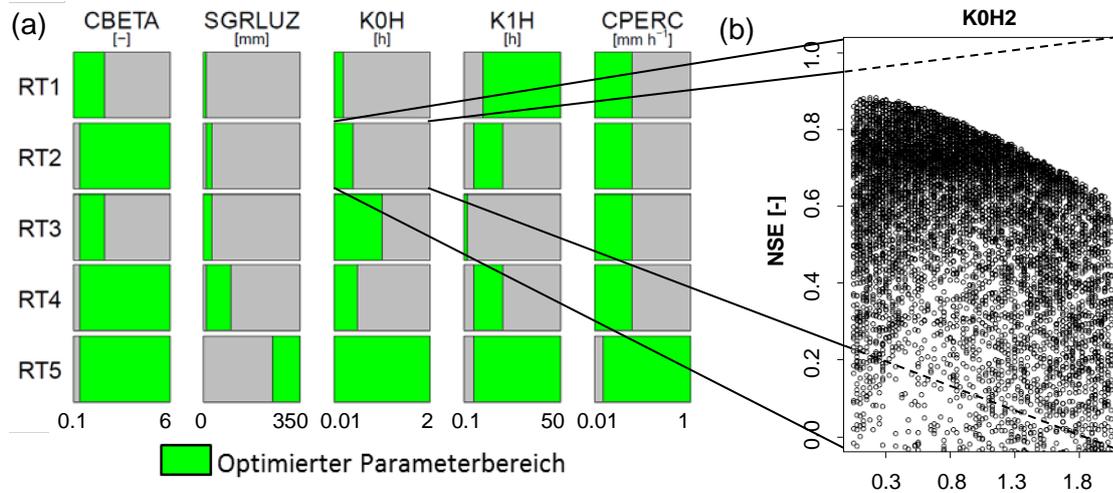


Abb. 3: (a) Parameterbereiche für jeden Abflusstyp (RT1-5), optimiert anhand der Nachrechnung von Berechnungsversuchen. (b) Beispiel der Optimierung des Parameterbereichs K0H für den Abflusstyp 2. NSE = „Nash-Sutcliffe Efficiency“

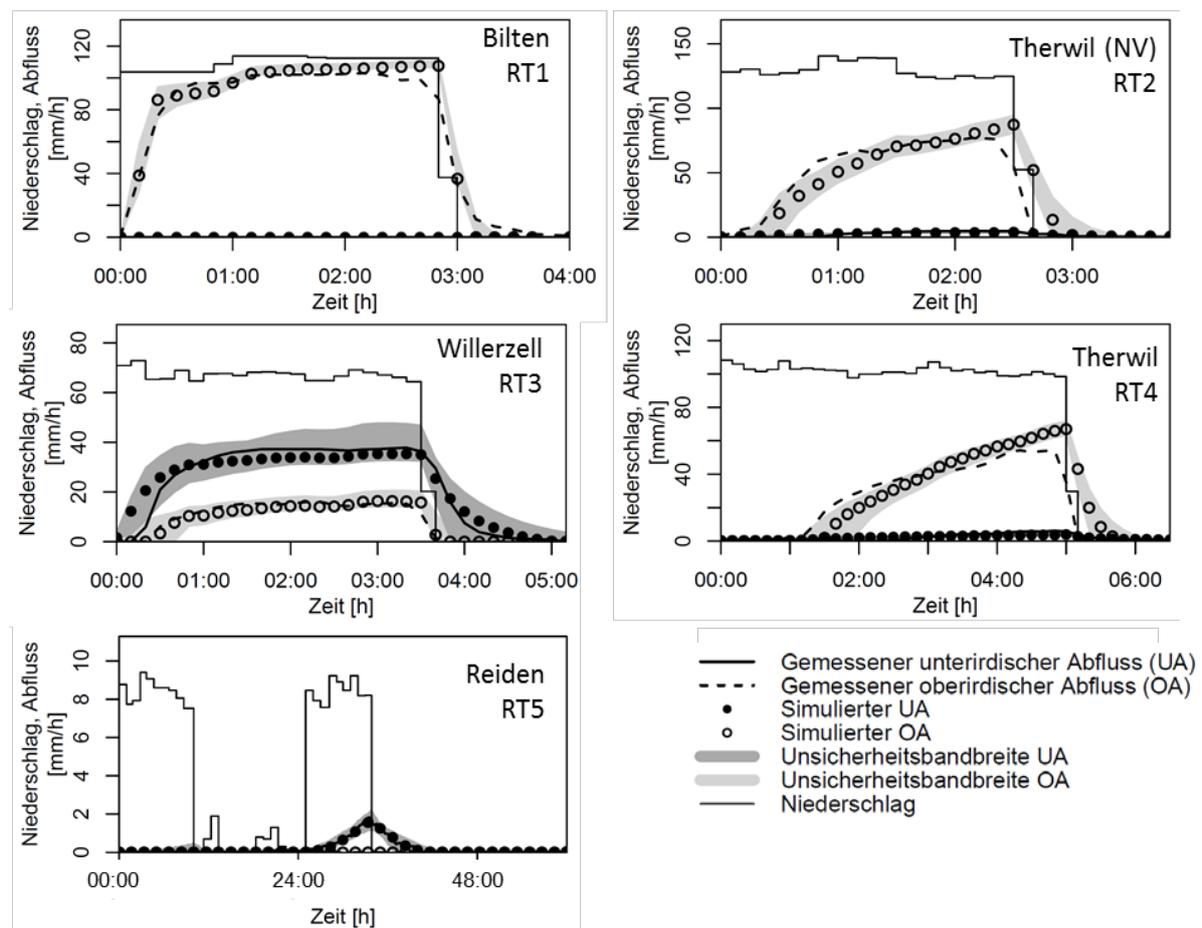


Abb. 4: Gemessene und nachgerechnete Abflussganglinien der Berechnungsversuche aus Tabelle 3. Unsicherheitsbandbreiten umfassen simulierten Abfluss der besten 100 Läufe.

Eine klare Unterscheidung ist zwischen schnell bis leicht verzögert beitragenden Flächen und sehr verzögert bis nicht beitragende Flächen festzustellen, wo den Speichergrenzwerten SGRLUZ geringe bzw. sehr grosse Werte zuerkannt werden. Diese a priori definierten Parameterbereiche sollen zur Differenzierung der Beiträge der verschiedenen Abflusstypen während der Abflussbildungsberechnung im prozessnahen Modell dienen.

Sowohl der oberirdische als auch der unterirdische Abfluss der Beregnungsversuche konnten in zufriedenstellender Weise nachgerechnet werden (Abbildung 4).

## **4 Übertragbarkeit auf klein- und mesoskalige Einzugsgebiete**

### **4.1 Die Untersuchungsgebiete**

Für diese Studie wurden zwei kleinskalige EZG in den Schweizer Voralpen sowie zwei mesoskalige EZG im Schweizer Mittelland ausgewählt (Abbildung 5). Der Sperbelgraben und der Rappengraben liegen wenige Kilometer voneinander entfernt im steilen Emmental. Diese kleinen EZG (ca. 0.5 km<sup>2</sup>) liegen in der Napf-Nagelfluh, die eine mittlere bis geringe Durchlässigkeit aufweist (BAFU 2015). In beiden Gebieten dominieren Braunerden mit mässigem Wasserspeichervermögen und normaler Durchlässigkeit. Nur die Landnutzung unterscheidet sich markant mit praktisch vollständiger Bewaldung im Sperbelgraben und nur etwa 50%iger Waldbedeckung im Rappengraben. In beiden Gebieten herrschen leicht verzögert bis verzögert reagierende Flächen (AT2 und AT3, ca. 95%) vor (Abbildung 6). Die Abflussreaktion ist daher ziemlich rasch und stark.

Das EZG der Reppisch bis Birmensdorf umfasst eine Fläche von 22 km<sup>2</sup>. Davon sind 12 % Siedlungs-, 48 % Gras- und 38 % Waldflächen. Die Reppisch hat sich tief in das von Gletschern geprägte Tal eingeschnitten und teilweise steile, heute meist bewaldete Flanken geschaffen. Der Unterbau des EZG bildet die aus Sandsteinen und Mergeln aufgebaute Obere Süsswassermolasse (HANTKE et al., 1967). Im Grossteil des EZG liegen ausgedehnte Flächen mit normal durchlässigen und speicherfähigen Braunerdeböden. Von Stau-, Hang- oder von Grundwasser geprägte Böden mit mässiger Durchlässigkeit und mässigem Speichervermögen sind im Gebiet weniger stark verbreitet. Insgesamt überwiegen im EZG der Reppisch verzögert bis stark verzögert reagierende Flächen (AT3 und AT4, 71.4%; Abbildung 6). Die Abflussreaktion kann daher als mässig bis stark bezeichnet werden.

Der Dorfbach entwässert in Meilen ein EZG von 4.6 km<sup>2</sup> und mündet direkt in den Zürichsee (Abb. 5 rechts). Das EZG des Dorfbachs Meilen ist von der Oberen Süsswassermolasse geprägt (HANTKE ET AL., 1967; ZINGG, 1934). Es ist vor allem die Nagelfluh, welche den oberflächennahen Untergrund dominiert. Lokal tritt Würmmoräne auf. Insgesamt liegen im EZG ausgedehnte Gebiete mit normal durchlässigen und speicherfähigen Braunerdeböden. Der Anteil an vernässten Böden mit mässiger Durchlässigkeit und eher geringem Speichervermögen ist höher als in der Reppisch. Im EZG des Dorfbachs machen die Abflusstypen 1-3 (rasch, leicht verzögert und verzögert beitragende Flächen) einen Anteil von insgesamt 41.5% der EZG-Fläche aus, 58.5% der Fläche reagieren stark bis sehr stark verzögert auf Niederschläge (AT4 und AT5; Abbildung 6). Aufgrund dieser Flächenverteilung zeigt der Dorfbach eine mässige bis starke Reaktion auf Niederschläge.

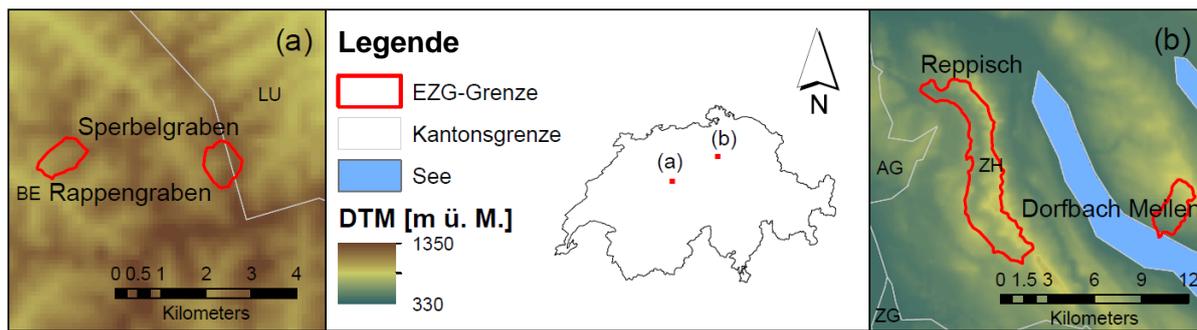


Abb. 5: Übersicht über die Untersuchungsgebiete.

Quelle: BFS GEOSTAT/Bundesamt für Landestopografie swisstopo.

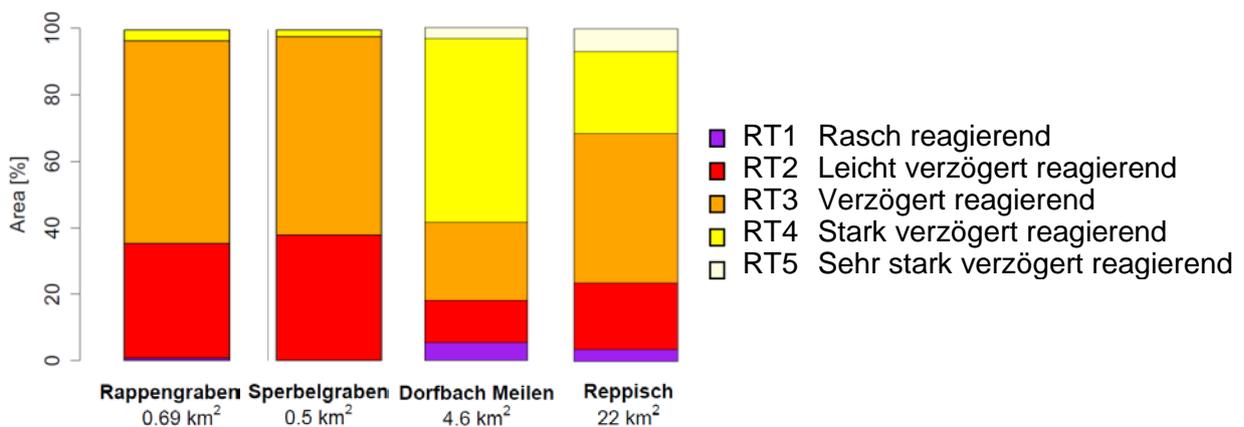


Abb. 6: Ausdehnung der Abflusstypenflächen in den vier Untersuchungsgebieten.

#### 4.2 Vergleich zwischen prozessnahe und traditionellem PREVAH

Um den Mehrwert der Verwendung von ATK bei der Anwendung auf ungemessene Gebiete aufzuzeigen, wurde ein Vergleich zwischen dem traditionellen und dem prozessnahen Modell durchgeführt. Da im prozessnahen Modell die Abflusskonzentration auf der Landoberfläche bis zum Auslass eines Teil-EZGs mit der Abflussbildung gekoppelt berechnet wird, muss bei Festlegung der Speicherkonstanten  $K_{0H}$  und  $K_{1H}$  die zeitliche Verzögerung des Abflusses verursacht durch die Fließzeit von jeder Fläche zum Teil-EZG-Auslass (auch als Abflusskonzentration bezeichnet) berücksichtigt werden. Dies geschah mit einer Monte Carlo (MC) Simulation, indem die Parameterwerte innerhalb der zuvor definierten Parameterbereiche optimiert wurden.

Dieselbe Vorgehensweise wurde für das traditionelle PREVAH verwendet, wobei die plausiblen Parameterbereiche für die MC Simulation in diesen Fall aus VIVIROLI et al., (2009b) stammen. Als Kalibrierungsgebiet wurde der Rappengraben gewählt, dessen Ausdehnung der durchschnittlichen Teil-EZG-Grösse entspricht. Die Simulationsperiode entspricht dem Monat Juni 2014. Da das prozessnahe Modul vor allem für die Simulation während und um grössere Ereignissen eingesetzt werden soll, ist beim Simulationsstart die Bestimmung einer Bodenfeuchte notwendig. Für diese Studie wurde die Bodenfeuchte für die untersuchten

EZG aus kontinuierlichen, „grossräumigen“ PREVAH-Simulationen mit einer Auflösung von 500 m täglich übernommen.

Für beide Modellversionen wurden die 10 besten Parameterkombinationen aus der Kalibrierungsphase ermittelt und auf die in Sektion 4.1 beschriebenen Untersuchungsgebiete angewandt. Die zeitliche Auflösung der Simulationen entspricht einer Stunde, der Auflösung der Niederschlagsdaten entsprechend. Um die optimierten Parameterbereiche in der prozessnahen Modellversion anwenden zu können, wurde jeder Zeitschritt in 6 Teilzeitschritte unterteilt (10 Minuten).

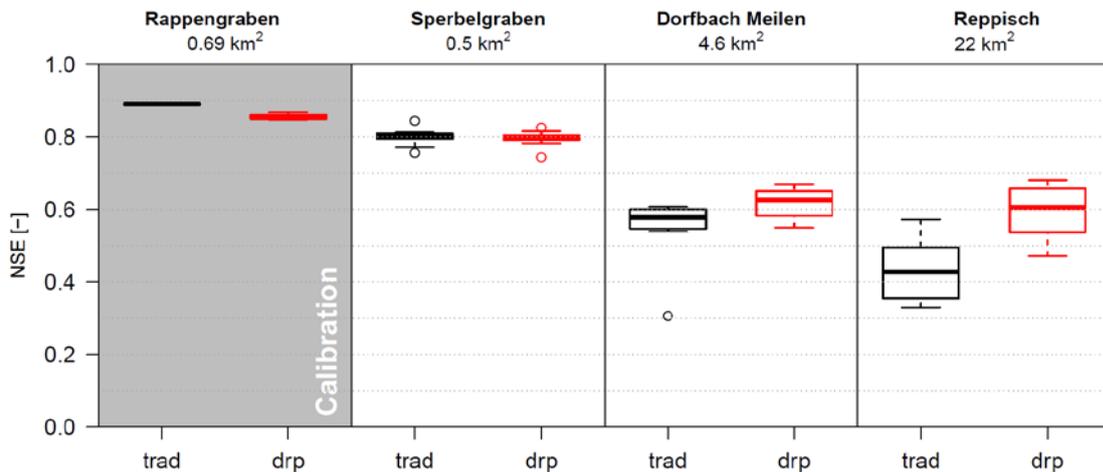


Abb. 7: Leistungsvergleich zwischen dem traditionellen PREVAH („trad“) und dem prozessnahen Abflussbildungsmodul („drp“) im Kalibrierungsgebiet (grauer Hintergrund) und auf die Verifikationsgebiete (weisser Hintergrund). Die Boxplots zeigen die Spannweite der Ergebnisse, die sich aufgrund der 10 besten Parameterkombinationen ergeben.

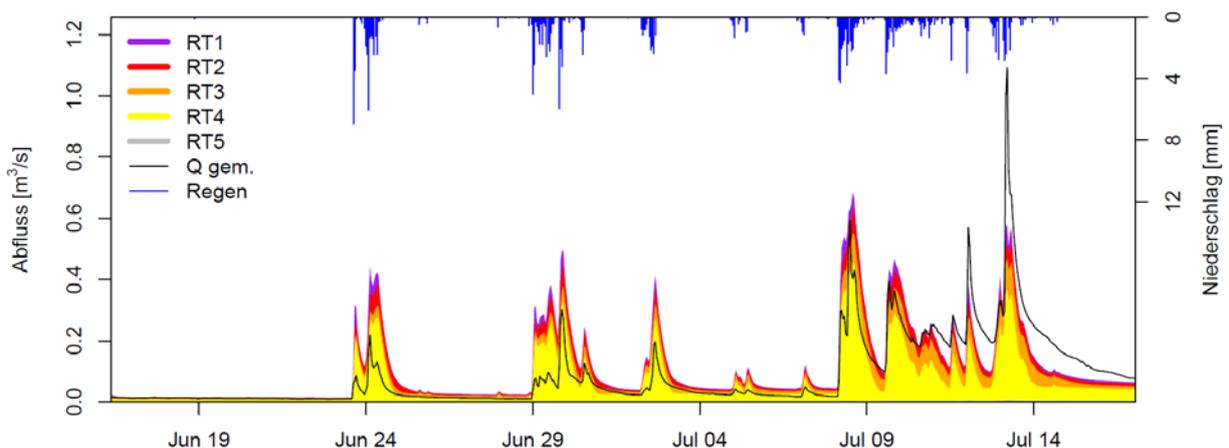


Abb. 8: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Abflussganglinie mit dem Beitrag der verschiedenen Abflusstypenflächen für den Dorfbach Meilen. Für die Simulation wurde die beste Parameterkombination aus der Kalibrierung im Rappengraben verwendet.

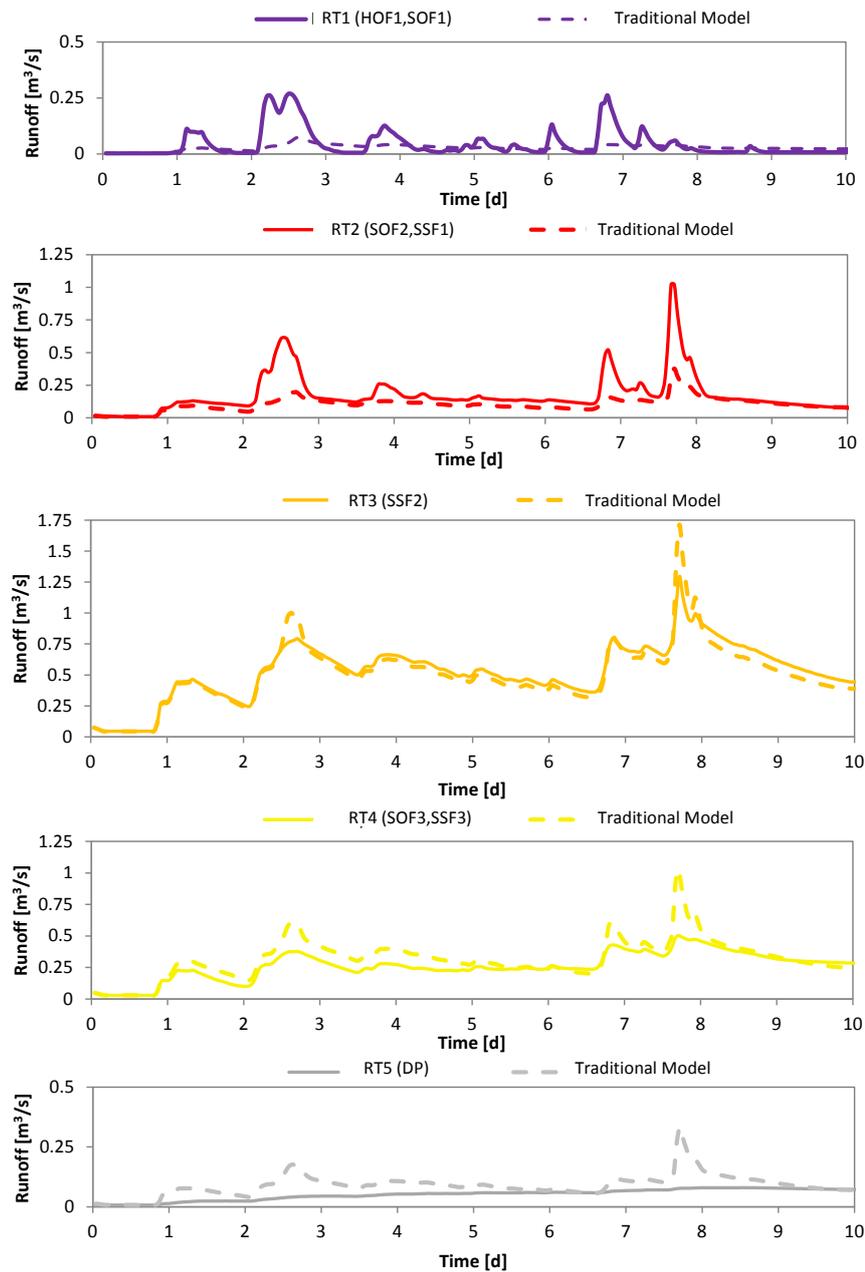


Abb. 9: Vergleich zwischen Abflussganglinien der unterschiedlichen Abflusstypen aus der Reppisch. Durchgehende Ganglinien zeigen den mit dem prozessnahen Abflussbildungsmodul berechneten Abfluss. Gestrichelte Linien zeigen die mit dem traditionellen PREVAH simulierte Ganglinie. Verändert nach BUSS (2014).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Modelle in den zwei kleinen EZG sowohl in der Kalibrierungsphase als auch in der Validierungsphase eine ähnliche Güte aufweisen. Die Simulationen in den beiden grösseren EZG konnten nur mit einer weniger guten Performance durchgeführt werden (Abbildung 7). Mögliche Gründe dafür lassen sich anhand von Abbildung 8 erahnen. Eine bedeutende Rolle in den Berechnungen nehmen sicherlich die Speicherkonstanten  $K0H$  und  $K1H$  ein. Sie wurden im meist sehr steilen Gebiet des Rappengraben kalibriert und dann auf die flacheren mittelländischen EZG der Reppisch und des Dorfbaches Meilen übertragen. Die zu rasche Reaktion im Dorfbach Meilen lässt sich teilweise auf die

sehr rasch entwässernden Speicher aus dem Rappengraben zurückführen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass eine sinnvolle Kalibrierung der Speicherkonstanten nur für die zwei im Rappengraben dominierenden Abflusstypen 2 und 3 (vgl. Abbildung 6) möglich war. Die Niederschlagsdaten und die Anfangsbedingungen können zusätzliche Quellen für Unsicherheiten sein. Die Unterschätzung der Abflussspitze am 13. Juli lässt sich z.B. durch einen ungenauen Niederschlagsinput erklären.

Jedenfalls zeigt das prozessnahe Modell im Vergleich zu dem traditionellen PREVAH sowohl im Dorfbach Meilen als auch in der Reppisch eine bessere Vorhersagefähigkeit (Abbildung 7). Mit dem neuen Modell liessen sich die Abflussprozesse besser nachbilden als mit dem herkömmlichen Modell (Abbildung 9). Im Vergleich zum traditionellen PREVAH sind die berechneten Abflussspitzen höher für schnell und leicht verzögert beitragende Flächen, während sie für stark verzögert und nicht beitragende Flächen gedämpfter sind.

## **5 Schlussfolgerungen und Ausblick**

Ziel dieser Studie war, den Mehrwert eines Niederschlag-Abflussmodelles aufzuzeigen, das räumlich verteilte Informationen zu den dominanten Abflussprozessen verwendet. Das prozessnahe Abflussbildungsmodul, das zu diesem Zweck entwickelt wurde, greift auf Parameter zurück, die durch die Nachrechnung von Beregnungsversuchen festgelegt wurden. Bei diesem ersten Versuch zeigt das Modell in der Kalibrierungsphase eine zum traditionellen, kalibrierten PREVAH vergleichbare Leistung. In ungemessenen Gebieten lassen sich die Abflüsse mit dem neuen Modell hingegen zuverlässiger berechnen.

Die Anfangsbedingungen können einen grossen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben. Deshalb ist es wesentlich, diese möglichst genau und realitätsnah festzulegen. Eine Schätzung der Feldkapazitäten aus der Abflusstypenkarte, die bereits hochaufgelöste Informationen bezüglich des Speicherverhaltens beinhaltet, könnte die Initialisierung des neuen Abflussbildungsmodells noch verbessern.

In einem nächsten Schritt soll das prozessnahe Modell so umgeschrieben werden, dass die Abflussbildung und die Abflusskonzentration entkoppelt werden. Dies ermöglicht es erst, den Einfluss der Verteilung der Abflussprozesse auf die Abflussganglinie zu rekonstruieren und die definierten Parameter direkt auf ungemessene Gebiete zu übertragen. Dazu könnte die Erstellung einiger Übertragungsfunktionen dienen, die Speicherkonstanten mit Gebiets-eigenschaften oder Landschaftstypen zu verknüpfen.

## **Danksagung**

Die Autoren bedanken sich beim Bundesamt für Umwelt (BAFU) für die Finanzierung der vorliegenden Studie und bei der MeteoSchweiz für die Bereitstellung der meteorologischen Daten.

## Literatur

- BAFU (2015): Abgerufen unter <http://www.hydrodaten.admin.ch/de/2282.html> und <http://www.hydrodaten.admin.ch/de/2283.html> am 19.10.2015.
- BUSS, R. (2014): Evaluating different dominant runoff processes mapping approaches with similarity measures and synthetic runoff simulations. Masterarbeit am Institut für Umwelt-ingenieurwissenschaften. ETH Zürich. 129 S.
- HANTKE, R. (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete. - Vierteljahresschr. Natforsch. Ges. Zürich, 112/2, S. 91 - 112.
- KIENZLER, P. (2007): Experimental study of subsurface stormflow formation. Diss ETH Zürich Nr. 17330, 94 S.
- MÜLLER, C., HELLEBRAND, H., SEEGER, M., AND SCHOBEL, S. (2009): Identification and regionalization of dominant runoff processes – a GIS-based and a statistical approach, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, S. 779-792.
- NAEF, F., SCHERRER, S., THOMA, C., WEILER, W., & FACKEL, P. (2000): Die Beurteilung von Einzugsgebieten und ihren Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung - aufgezeigt an drei Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz. Untersuchung im Auftrag des Landesamts für Wasserwirtschaft, Rheinland Pfalz. IHW Bericht B 003.
- SCHERRER AG (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Landesamt für Umwelt, Wasserwirts. und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz.
- 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. & NAEF, F. (2003): A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland, *Hydrological Processes*, 17, S. 391-401.
- SCHMOCKER-FACKEL, P., NAEF, F., AND SCHERRER, S. (2007): Identifying runoff processes on the plot and catchment scale, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, S. 891-906.
- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Diss. 12018, ETH Zürich, 163 S.
- SIDERIS, I. V., GABELLA, M., ERDIN, R., & GERMANN, U. (2014): Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140, S. 1097-1111.
- VIVIROLI, D., ZAPPA, M., GURTZ, J., & WEINGARTNER, R. (2009a): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools, *Environ. Model. Softw.*, 24, S. 1209-1222.
- VIVIROLI, D., MITTELBACH, H., GURTZ, J., & WEINGARTNER, R. (2009b): Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results, *Journal of Hydrology*, 377, S. 208-225.
- ZINGG, T. (1934): Erläuterungen zu Atlasblatt 7 (226 Monchaltorf, 227 Hinwil, 228 Wädenswil, 229 Rapperswil). *D. geol. Atlas der Schweiz*.

# Abbildbarkeit mehrfach vernetzter heterogener dezentraler Maßnahmen in N-A-Modellen

Sandra Hellmers

## Zusammenfassung

Optimierte hydrologische Modellierungsansätze werden benötigt, um eine große Anzahl räumlich verteilter heterogener Maßnahmen abzubilden, die als kaskadierende Systeme in urbanen Gebieten umgesetzt werden können. In der Stadtentwässerung ist bereits seit mehreren Jahren ein Umdenken von einer zentralen Entwässerung hin zu einer dezentralen Bewirtschaftung zu erkennen. In diesem Beitrag werden ein theoretischer Ansatz zur Abbildbarkeit der Maßnahmen und dessen Implementierung in einem N-A-Modell vorgestellt. Die Ergebnisse der Anwendungsstudie am Beispiel eines Einzugsgebietes in Hamburg zeigen das Potential zur Minderung der Auswirkungen von Hochwasser in städtischen Einzugsgebieten durch dezentrale Maßnahmen.

## 1. Einleitung

Anlass zur Entwicklung einer Methodik zur Abbildung mehrfach vernetzter heterogener Maßnahmen in N-A-Modellen ist der Bedarf zur Anpassung städtischer Entwässerungssysteme an zukünftige Veränderungen, deren Ausmaß nur mit größeren Unsicherheiten abgeschätzt werden kann. Heterogene hydrologische Prozesse können die Abflussreaktion in Einzugsgebieten maßgeblich bestimmen. Insbesondere in urbanen Gebieten ist die Heterogenität durch räumlich stark veränderte Landnutzung sehr hoch. In der Stadtentwässerung ist bereits seit mehreren Jahren ein Umdenken von einer zentralen Entwässerung hin zu einer dezentralen Bewirtschaftung zu erkennen. Die Herausforderung besteht hier insbesondere darin, dass mit größeren Unsicherheiten in der weiteren Urbanisierung und der Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen zu rechnen ist. Diese Veränderungen können zu einer Zunahme der Belastung städtischer Entwässerungssysteme und zu einer Zunahme der Oberflächenabflüsse führen, die kontrolliert abgeleitet werden müssen. Bestehende Regenwasser- und/oder Mischwassersiele sind aus wirtschaftlichen und technischen Gründen aber nur bis zu einem bestimmten Bemessungsfall ausgelegt.

Es werden daher Methoden entwickelt, die flexibel angepasst werden können, sodass das Regenwasser auf nachhaltige Weise bewirtschaftet werden kann. Die Implementierung dezentraler Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen (DRWBM) wird in zunehmendem Maße wegen ihrer Anpassungsfähigkeit und ihrer multifunktionalen Eigenschaften als geeignete Herangehensweise im städtischen Hochwassermanagement betrachtet (e.g. Wong et al., 2013). Dabei erfolgt die Entwässerung des Regenwassers auf natürlicher Weise über Versickerung, Retention und Speicherung in städtischen Gebieten (BUTLER u. DAVIES 2011). Zum Einsatz kommen hier zumeist bepflanzte Strukturen wie Mulden, unterirdische Speicher, durchlässige Beläge und begrünte Dächer mit begrenzter Wasserspeicherfähigkeit. Die Kontrolle des überlaufenden Wassers, welches die Speicherkapazität dieser dezentralen Maßnahmen überschreitet, ist daher ein wichtiger Aspekt im Rahmen des Hochwassermanagements. Das Überlaufwasser kann oberflächlich über Straßen und Wege zu sog. multifunktionalen Flächen (z.B. Parkanlagen) umgeleitet werden. Durch die Hintereinanderschaltung dieser Maßnahmen kann ein angepasstes System erreicht werden (HELLMERS et. al, 2015 [1]).

Im Rahmen des 4. Niederschlag-Abfluss-Workshops (2015, Trier) wurde ein theoretisches Konzept zur Abbildbarkeit solcher mehrfach vernetzten heterogenen und dezentralen Maßnahmen vorgestellt. Der theoretische Ansatz wurde in ein N-A-Modell implementiert, welches aktuell für das Hochwassermanagement in Hamburg eingesetzt wird. Im KLIMZUG-Nord Projekt (2009 – 2014) wurde das Modell zur Abschätzung der Wirksamkeit von räumlich kleinskaligen DRWBM und multifunktionalen Flächen zur Minderung der Überschwemmungsgebiete im Einzugsgebiet der Wandse, einem Flusslauf in der Stadt Hamburg angewendet. In der Fallstudie erfolgten Untersuchungen der Auswirkungen zukünftiger Klimaszenarien und Stadtentwicklungsszenarien.

## 2. Theoretischer Ansatz

Der theoretische Ansatz basiert darauf, dass die räumliche Verteilung von DRWBM in Abhängigkeit der gegebenen Stadtstrukturen erfolgt. Hierbei können begrünte Dächer nur auf entsprechenden Dachkonstruktionen, und Versickerungs- sowie Rückhaltemaßnahmen nur auf Freiflächen ausgewiesen werden. Erforderlich ist also eine flächenscharfe Abbildung der Maßnahmen auf lokaler Ebene. Die flächenscharfe Verteilung der Maßnahmen kann durch die bestehenden Datengrundlagen der Landesbetriebe erfolgen. Hier liegen zumeist schon Daten aller Gebäudeflächen und auch der Dachtypen vor. In Hamburg arbeitet das Institut für Wasserbau bereits eng mit dem Landesbetrieb für Straßen Brücken und Gewässer (LSBG) zusammen.

Diese detaillierte heterogene Zuordnung erfordert einen Modellansatz, welcher eine größere Anzahl räumlich verteilter Maßnahmen für gesamte Fluss-Einzugsgebiete abbilden kann.

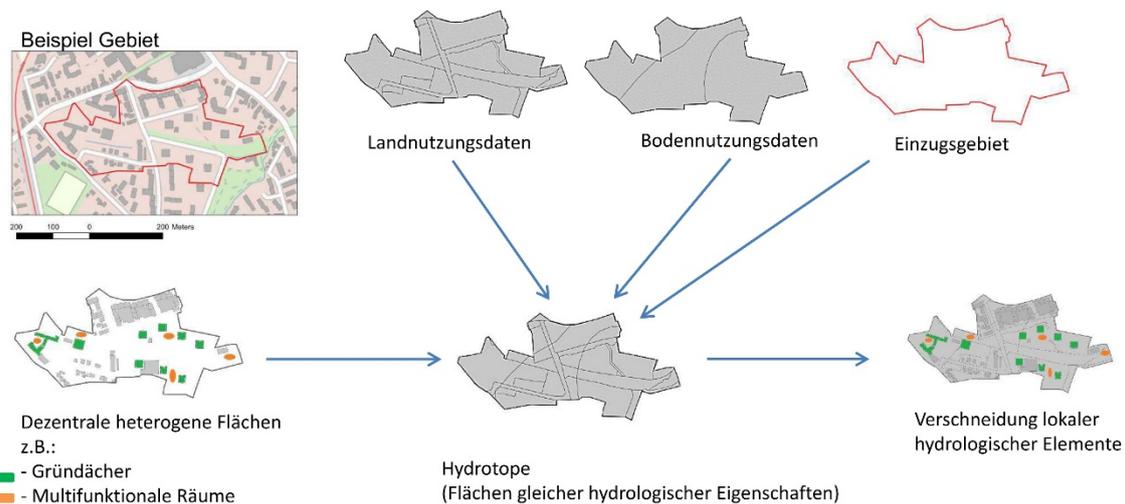


Abb. 1: Räumliche Verschneidung und Integration der dezentralen heterogenen Maßnahmen zu Flächen gleicher hydrologischer Eigenschaften (Hydrotopen) (HELLMERS et. al., 2016)

In der Abbildung 1 ist das theoretische Konzept der Einbindung von dezentralen heterogenen Maßnahmen schematisch dargestellt. Der Modellansatz basiert auf der Basis von Hydrotop-Datensätzen, welcher in semi-distributiven hydrologischen Modellen (SDHM) angewendet

det wird. Die dezentralen heterogenen Flächen (z.B. Gründächer, multifunktionale Flächen) werden mit zusätzlichen Parametern bzw. Wasserbilanzfunktionen abgebildet. Zudem erfolgt eine Verschneidung mit den Flächen der Hydrotopen, um lokale hydrologische Elemente (z.B. DRWBM) zu definieren.

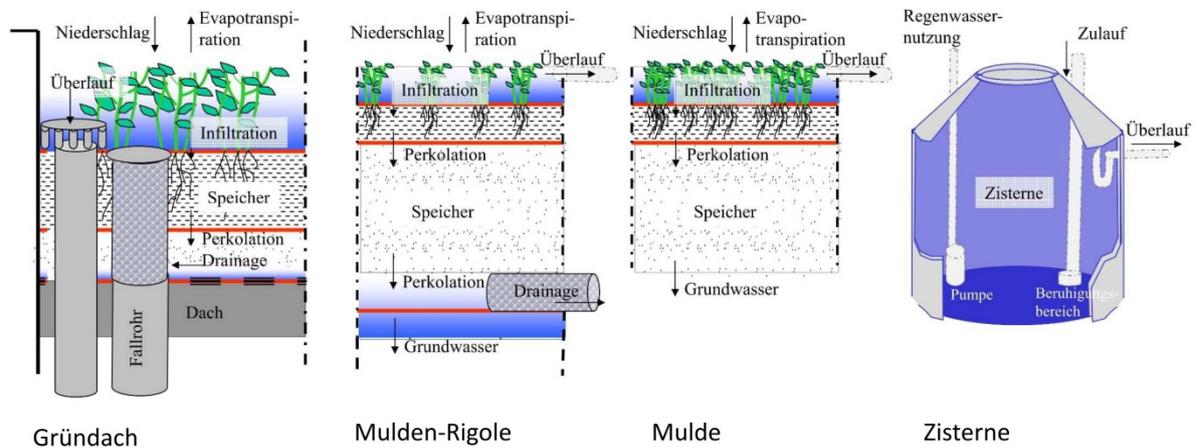


Abb. 2: Schematische Darstellung der Unterteilung von DRWBM Elementen in Schichten am Beispiel eines Gründach-, eines Mulden-Rigolen-, eines Mulden- und eines Zisternen-Elementes (HELLMERS 2010)

DRWBM Elemente bestehen aus unterschiedlichen Speicher- und Materialschichten, deren Eigenschaften bzw. Parameter differenziert abgebildet werden (siehe Abbildung 2). Die Parameter der einzelnen Schichten werden den jeweiligen DRWBM (z.B. begrünte Dächer, Mulden, Mulden-Rigolen-Systeme) in den Hydrotopen über Klassifizierungen zugewiesen und in das Modell importiert. Eine Beschreibung der theoretischen Ansätze und der Parameter ist in einer früheren Publikation veröffentlicht (HELLMERS 2010).

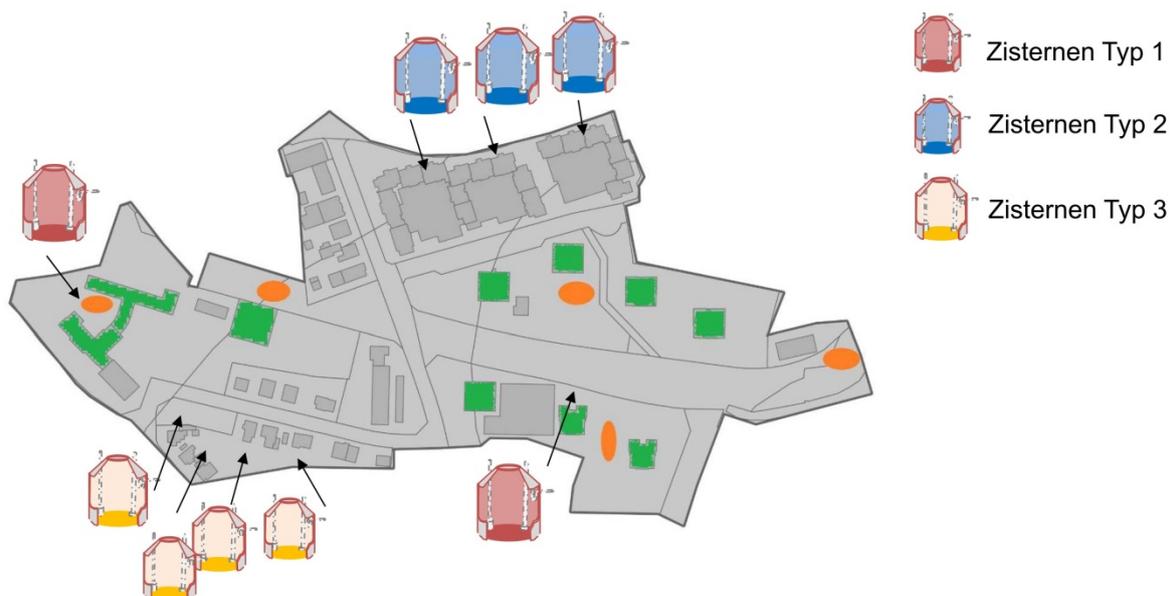


Abb. 3: Jeder Zisternentyp ist definiert mit Volumenangaben und Regenwassernutzungskennlinien

Pro Teilgebiet werden kleinräumig heterogene Elemente unterschiedlicher Maßnahmen abgebildet. Aus Abbildung 3 wird ersichtlich, dass unterschiedliche Zisternentypen für unterschiedliche Gebäudetypen vorgesehen werden können. Zisternen bei Einfamilienhäusern werden mit anderen Speichervolumen und auch unterschiedlichem Verbrauch bemessen, als Zisternen für größere Reihen- oder auch Bürohäuser. Jeder Zisternentyp ist definiert mit Volumen Angaben und Regenwassernutzungskennlinien. Diese Kennlinien wurden im Rahmen der Arbeit von SVERDLOVA (2015) aufbereitet.

### 3. Implementierung

KalypsoHydrology ist ein semi-distributives OpenSource Modell zur Simulation des Niederschlags-Abflusses in urbanen und ländlichen Einzugsgebieten (PASCHE 2003). Es wurde erweitert mit Modulen zur Integrierung der DRWBM Parameter als Überlagerungselemente (sog. „Overlays“) für Hydrotope<sup>1</sup>. Der Netzplan in dem hydrologischen Modell zur Beschreibung der Abflussprozesse vom Oberlauf zum Unterlauf eines Flusssystems umfasst Teileinzugsgebiete, Flusstränge und Knoten (siehe Abbildung 4). Die Parametersätze der Overlays umfassen u.a. die max. Rückhaltekapazitäten und Parameter der Überlaufrohre, um die Überlaufmengen von einzelnen DRWBM zu bestimmen. Die entwickelte Methodik ermöglicht so die Anbindung der DRWBM in Form eines kaskadierenden Systems, wobei die Überlaufmengen nach Erreichen der maximalen Kapazitäten abgeleitet werden (siehe Abbildung 5).

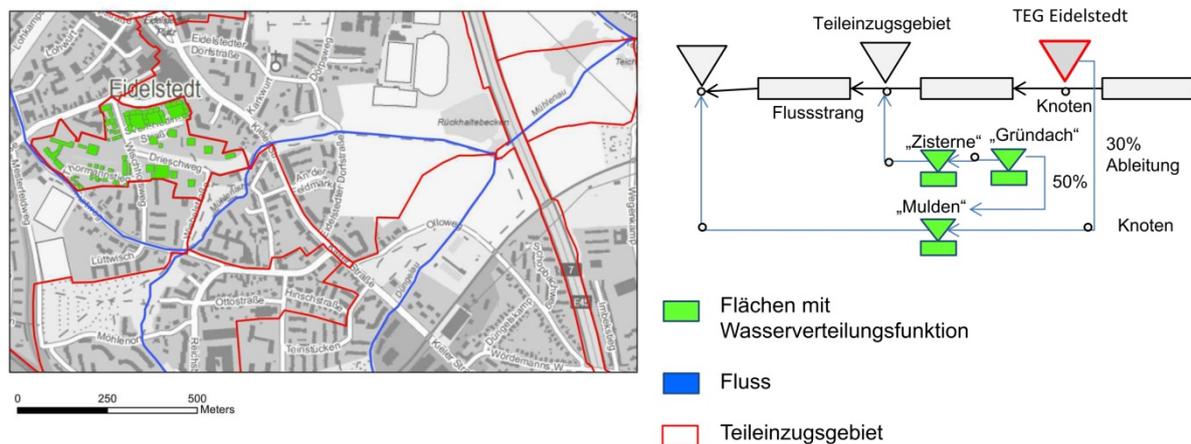


Abb. 4: Implementierung des theoretischen Ansatzes von vernetzten hydrologischen Elementen (HELLMERS et. al. 2016)

Hydrotope-Elemente mit den Eigenschaften der Overlays wurden dahingehend erweitert, dass diese Wasser aufnehmen und abgeben können. Der Model-Netzplan wurde mit zusätzlichen Verlinkungen erweitert, um eine Neuverteilung des Wassers von Entwässerungsknoten in einzelne Flächen (z.B. DRWBM) abzubilden. Während des Simulationslaufes werden diese als zusätzliche Flächen in dem Model-Netzplan mit Entwässerungssträngen und Entwässerungsknoten integriert. Ein schematisches Beispiel wird in Abbildung 5 gezeigt. Wird die maximale Kapazität eines Elementes (z.B. Gründach) durch ein Niederschlagsereignis

<sup>1</sup> <http://sourceforge.net/projects/kalypso/files/Kalypso>

(P) erreicht, erfolgt die Ableitung des Überschusswassers in größere Rückhalteflächen (z.B. Multifunktionale Flächen) oder ins Kanalnetz.

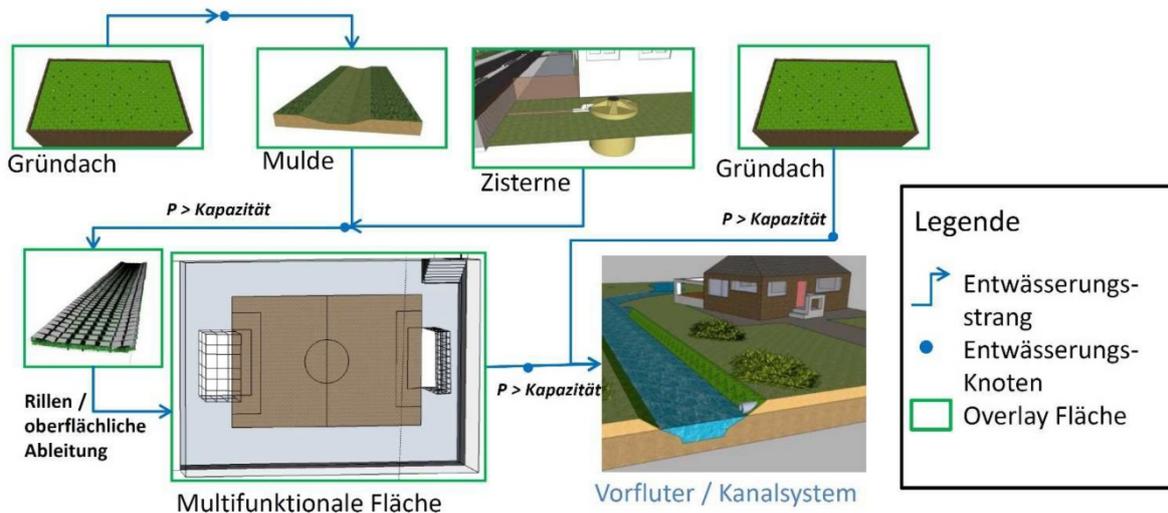


Abb. 5: Modellansatz der Overlays mit Wasseraufnahme und Wasserabgabe (HELLMERS et. al. 2015 [1])

Zur Abschätzung der Wirksamkeit von kaskadierenden kleinflächigen DRWBM und größeren Rückhalteflächen zur Minderung des Hochwasserrisikos wurden die Modellansätze in das Open-Source-Softwareprojekt Kalypso (<http://kalypso.bjoernsen.de>) implementiert. Diese Software kombiniert hydrologische und hydraulische Modelle mit Risikomodellen zur Verwendung im Hochwasserrisikomanagement. Die Datenaufbereitung und Prozesskette in der Kalypso-Plattform wird in Abbildung 6 aufgezeigt. Mögliche Auswirkungen durch den Klimawandel oder durch Stadtentwicklungen werden als Szenarienläufe im Modell untersucht. In einem weiteren Schritt werden Anpassungsstrategien mit DRWBM und multifunktionalen Rückhalteflächen in das Modell als Szenarienläufe eingebracht, um die Wirksamkeit dieser Strategien unter zukünftigen möglichen Belastungen zu quantifizieren.

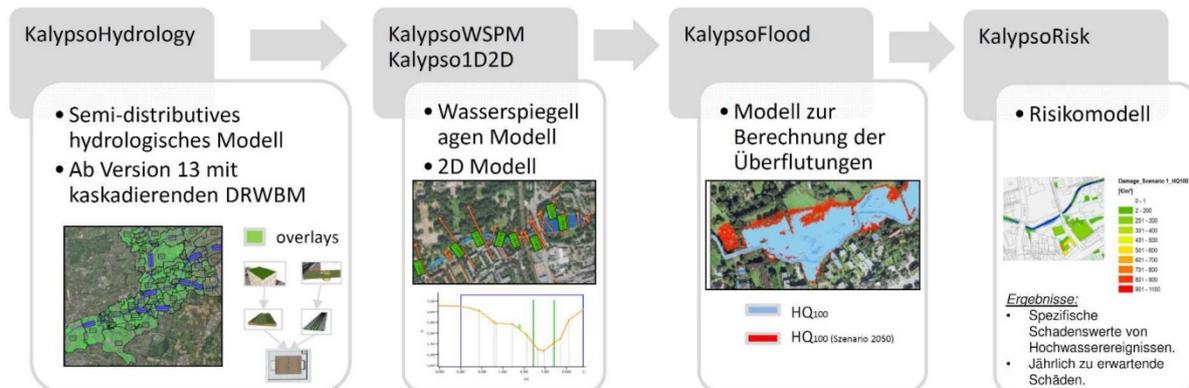


Abbildung 6 Einsatz der Modelle des Open-Source-Softwareproduktes Kalypso im Hochwasserrisikomanagement (HELLMERS et al., 2015 [1])

Die DRWBM, welche als neue Flächen definiert sind, werden als GIS-Shape-Datei importiert. Es folgt die Bestimmung der DRWBM Parametersätze (z.B. Schichtaufbau und Überlaufrohre) und die Prüfung des Modell-Netzplans auf mögliche kaskadierende Systeme durch die Software. Flächen (hier: Overlays), die mit der Funktionalität der Wasseraufnahme und Wasserabgabe (z.B. Mulden und Mulden-Rigolen-Systeme) definiert sind, werden mit Entwässerungssträngen und Entwässerungsknoten in dem Modell-Netzplan verknüpft.

Klimawandelszenarien werden untersucht durch die Einbeziehung von Ergebnissen der Klimamodellsimulationen der Referenzzeiträume, sowie möglicher zukünftiger Projektionen (z.B. IPCC Szenarien). Auswirkungen auf langfristige Wasserbilanzveränderungen, sowie auf Extremereignisse können untersucht werden. In der Modellkette von Kalypso werden nichtstationäre Strömungsberechnungen mit einem 1D Wasserspiegellagenmodell (KalypsoWSPM) berechnet. Zusätzlich werden instationäre Strömungen mit einem 1D-2D Modell berechnet. In der Nachbereitung der Ergebnisse erfolgt die Berechnung der Überflutungsausbreitung und Wassertiefen auf der Basis von digitalen Geländemodelldaten mit dem Modell KalypsoFlood. Mit dem Modell KalypsoRisk erfolgt die Berechnung der Risiken in den überschwemmten Flächen.

#### 4. Anwendungsstudie

Das Modell wurde angewendet zur Quantifizierung der Auswirkungen durch Klimawandel- und Stadtentwicklungsszenarien für die Stadt Hamburg einschließlich der Entwicklung von Anpassungsstrategien mit DRWBM und der Schaffung von Regenwasserrückhalteflächen (ROTTGARDT et. al., 2014). Der Flusslauf der Wandse ist 21,5 km lang und entwässert ein Einzugsgebiet von 88 km<sup>2</sup>. Die Quelle des Flusses liegt im ländlich geprägten Schleswig-Holstein und fließt im Unterlauf durch das stark urbane Gebiet Wandsbek.

Im KLIMZUG-Nord Projekt wurden drei sozioökonomische Szenarien bis 2050 in einer Gruppe von unterschiedlichen Fachdisziplinen (u.a. Stadtplanern, Ökologen, Meteorologen) und in Absprache mit Behörden für Hamburg entwickelt (ROTTGARDT et. al. 2014). Diese sind in Abbildung 7 dargestellt.

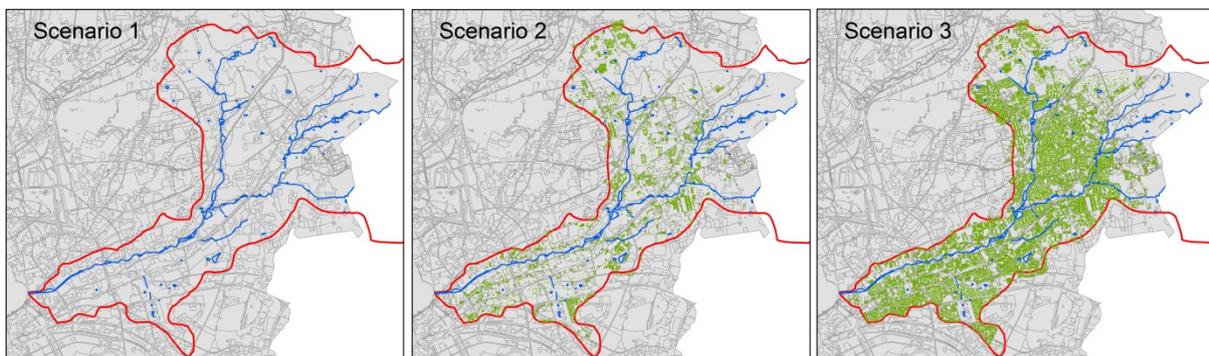


Abb. 7: Räumliche Verteilung von Anpassungsstrategien in Sozio-ökonomischen Szenarien für 2050 (HELLMERS et. al. 2015 [1])

Im ersten Szenario (S1) wurde eine Zunahme der Bevölkerung im Umland und eine Abnahme der Bevölkerung im Kerngebiet der Innenstadt angenommen. Durch geringere finanzielle Mittel werden Gebäude, sowie Infrastruktur kaum weiterentwickelt und auch kaum Anpass-

sungsstrategien umsetzbar sein. Im Szenario S2 wird eine Zunahme der Bevölkerung in der Innenstadt Hamburgs angenommen. Gebäude und Infrastrukturen werden in diesem Szenario erweitert. Die bebauten und versiegelten Flächen in der Innenstadt werden vergrößert, wodurch der Bedarf nach alternativen Ableitungssystemen steigt. In diesem Szenario wird eine anteilige finanzielle Unterstützung und Umsetzung von DRWBM angenommen. Im Szenario 3 wurde auch eine Zunahme der Bevölkerung in der Innenstadt angenommen. Allerdings wurden hier Beschränkungen zur Bebauung von Freiflächen vorgenommen und zusätzliche Nutzflächen durch Aufstockung realisiert. Zusätzliche versiegelte Flächen sind daher gering und die finanzielle Unterstützung zur Umsetzung von Anpassungsstrategien ist höher als im Szenario S2. Die räumliche Verteilung der Anpassungsstrategien wird aufgezeigt in Abbildung 7 und Abbildung 8.

Im Szenario S3 wurden insbesondere Flächenanpassungsstrategien vorgesehen, wie zum Beispiel Teilentsiegelungen durch den Einsatz von durchlässigen befestigten Oberflächen und die Entwässerung von befestigten Flächen in Versickerungs- und Rückhaltemaßnahmen (Abbildung 8).

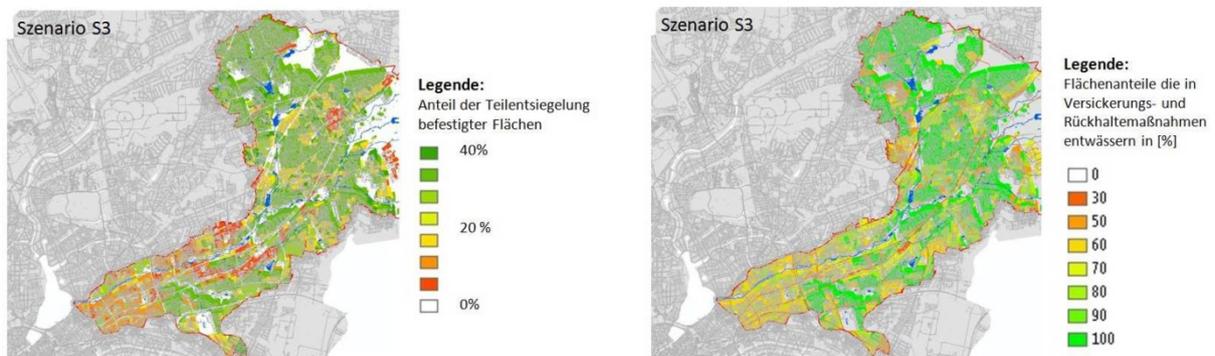


Abb. 8: Flächenanpassungen im Szenario 3

Eine Untersuchung möglicher Auswirkungen durch den Klimawandel auf die Hochwasserspitzenabflüsse in dem Einzugsgebiet der Wandse wurde auf der Grundlage der Daten von zwei regionalen Klimamodellläufen von (REMO) für das IPCC-Klimaszenario A1B (JACOB et al., 2006; JACOB et al., 2009) durchgeführt. Es wurden Langzeitsimulationen und Hochwasserereignisse in dem Zeitraum 2036 – 2065 untersucht. Das Vorgehen und die Ergebnisse der Untersuchungen wurden veröffentlicht in HELLMERS & HÜFFMEYER (2014). Mit den Klimaszenarienläufen wurde eine Erhöhung von bis zu 20% der Abflussspitzen für ein 100jähriges Ereignis berechnet (Abbildung 9).

Diese Ergebnisse dienen im Weiteren für die Untersuchung der Wirkungsanalyse von Anpassungsmaßnahmen.

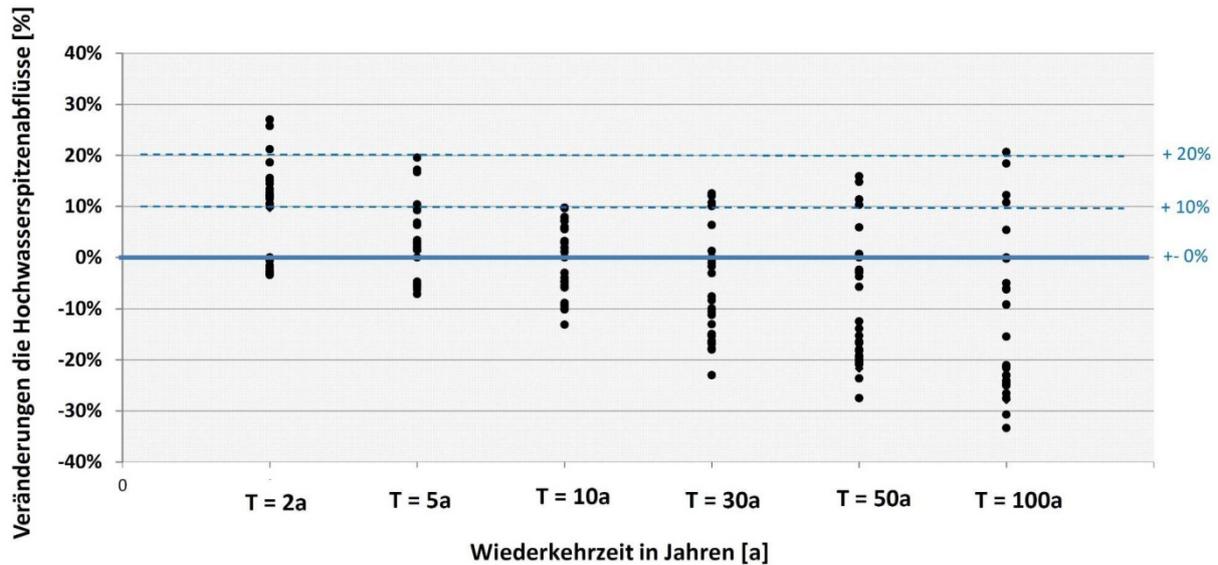


Abb. 9: Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserspitzenabflüsse (2036 – 2065) (Datengrundlage: REMO A1B\_1 und A1B\_2; JACOB et al., 2006; JACOB et al., 2009) (HELLMERS et al., 2015 [1])

Mit dem Software Modul KalypsoHydrology wurden die Auswirkungen durch den Klimawandel und die Stadtentwicklungsszenarien für die nahe Zukunft 2050 quantifiziert. Basierend auf den Ergebnissen der Hochwasserspitzenabflüsse wurde die Ausbreitung der Überflutungsflächen mit den Modellen KalypsoWSPM und KalypsoFlood berechnet. Die Ergebnisse der Wassertiefen und Überflutungsflächen der Szenarien sind beispielhaft dargestellt in Abbildung 10 für ein städtisch-ländliches Gebiet (HELLMERS u. HÜFFMEYER 2014). Im Oberlauf des Flussgebietes bewirkt eine Erhöhung der Hochwasserabflussspitzen auch eine Erhöhung der überschwemmten Flächen. Insbesondere die nördliche Freifläche ist hiervon betroffen.

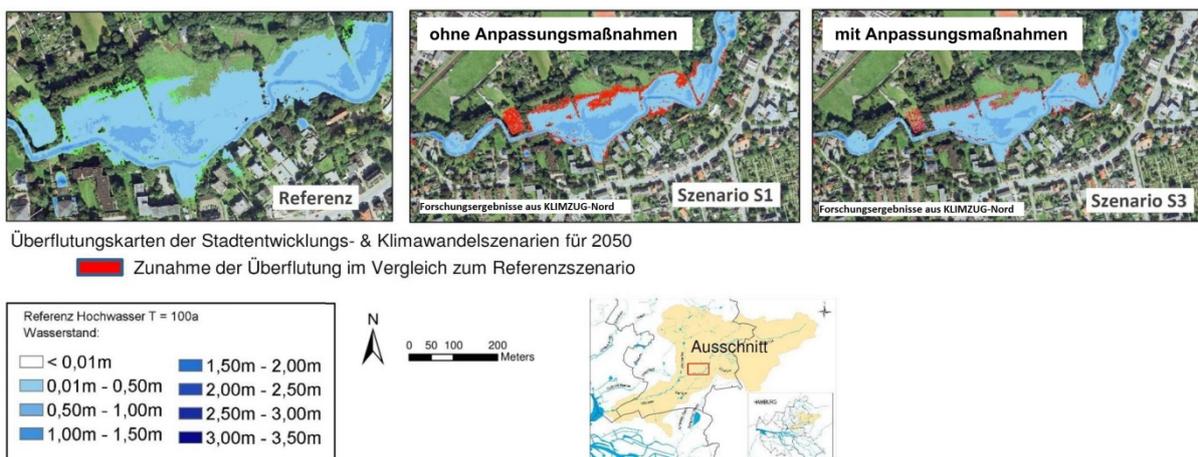


Abb. 10: Ergebnisse der sozioökonomischen Szenarien S1 und S3 im Vergleich zum Referenzszenario. Veränderung der Wassertiefen und Überflutungsfläche unter Annahme einer 20% Erhöhung der Abflussspitze eines HQ100 durch den Klimawandel. (HELLMERS et al., 2015 [1])

Im sozioökonomischen Szenario 1 (ohne Anpassung) und der Erhöhung der Hochwasserspitzenabflüsse von 20% durch den Klimawandel wurde eine Vergrößerung der überfluteten Flächen bei einem 100jährigen Hochwasserereignis berechnet. Im Szenario S3 (mit Anpassung) werden die Auswirkungen durch die Stadtentwicklung und den Klimawandel reduziert. Die Implementierung der Maßnahmen im Szenario S3 zeigt eine Reduzierung der überfluteten Flächen sowie Wassertiefen, und damit eine positive Wirksamkeit im Umgang mit den Auswirkungen des Klimawandels und zukünftigen Stadtentwicklungen.

## 5. Fazit

Der entwickelte Modellansatz mehrfach vernetzter heterogener dezentraler Maßnahmen ermöglicht die detaillierte Abbildung einer großen Anzahl von räumlich verteilten DRWBM in städtischen Einzugsgebieten und die Umleitung des Überschusswassers zu größeren Wasserrückhalteflächen. Das verbesserte Modellsystem ist Teil der Software Plattform Kalypso. Die ersten Ergebnisse dieser Fallstudie in Hamburg zeigen das Potential zur Minderung der Auswirkungen von Hochwasser in städtischen Einzugsgebieten durch dezentrale Maßnahmen auf. Allerdings müssen Unsicherheiten in den Klimawandelprojektionen, den sozioökonomischen Stadtentwicklungsszenarien und den Impactmodellen weiter untersucht werden, um Entscheidungen im Rahmen des zukünftigen Hochwasserrisikomanagements in städtischen Einzugsgebieten zu unterstützen.

## Danksagung

Die Arbeit in diesem Fachbeitrag wurde ermöglicht durch die finanzielle Unterstützung im Rahmen des BMBF-Projektes KLIMZUG-Nord.

## Literatur:

- BUTLER, D. und DAVIES, J. (2011): Urban Drainage. 3rd Edition. Spon Press, New York, NY, USA.
- HELLMERS, S. (2010): Hydrological Impacts of Climate Change on Flood Probability in Small Urban Catchments and Possibilities of Flood Risk Mitigation. Hamburger Wasserbau-Schriften 13, Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg.
- HELLMERS, S. und HÜFFMEYER, N. (2014) Folgen für Kanalnetz und Gewässer. In: KRUSE, E., ZIMMERMANN, T., KITTEL, A., DICKHAUT, W., KNIELING, J., SÖRENSEN, C. (2014): Stadtentwicklung und Klimaanpassung beispielhaft dargestellt am Einzugsgebiet der Wandse, TuTech Verlag, Hamburg.
- HELLMERS S., MANOJLOVIC N., PALMARICCIOTTI G., KURZBACH S., FRÖHLE P. (2015 [1]): Multiple linked sustainable drainage systems in hydrological modelling for urban drainage and flood risk management. Journal of Flood Risk Management. DOI: 10.1111/jfr3.12146. Article first published online: 17 MAR 2015
- HELLMERS S.; PALMARICCIOTTI G., MANOJLOVIC N., FRÖHLE P. (2015 [2]): Modellierung der Wirksamkeit dezentraler Maßnahmen zur Minderung des Hochwasserrisikos. In: Mariele E. und Diekkrüger B.: Aktuelle Herausforderungen im Flussgebiets- und Hochwassermanagement, Prozesse | Methoden | Konzepte, Beiträge

- zum Tag der Hydrologie am 19./20. März 2015 an der Universität Bonn, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 35.15. ISBN: 978-3-88721-229-2
- HELLMERS S., MANOJLOVIC N., PALMARICCIOTTI G., FRÖHLE P (2016): Modelling decentralised systems for urban drainage and flood mitigation. Journal of Applied Water Engineering and Research. DOI: 10.1080/23249676.2015.1128368..
- JACOB, D. und MAHRENHOLZ, P. (2006): REMO A1B scenario run. REMO climate of the 20th century run. UBA project, World Data Centre for Climate. CERA-DB: <http://cera-www.dkrz.de/>(abgerufen Mai 2011)
- JACOB, D., NILSON, E., TOMASSINI, L., BÜLOW, K. (2009): REMO A1B scenario run. REMO climate of the 20th century run. BFG project. World Data Center for Climate (CERA-DB). <http://cera-www.dkrz.de> (abgerufen Mai 2011)
- PASCHE, E. (2003): Wasserbau – fünf Jahre: Alles fließt (River and Coastal Engineering – five years: everything flows); Department of River and Coastal Engineering, Technical University Hamburg Harburg; Schüthedruck GmbH, Hamburg, Deutschland.
- ROTTGARDT, E., SCHOETTER, R., KRUSE, E., KUNERT, L., SCHMIDT, K., STOCKINGER, J., VERJANS, E. (2014): Entwicklungsszenarien, Strategien und Anpassungsmaßnahmen. In: Kruse E., Zimmermann T., Kittel A., Dickhaut W. Knieling J., Sörensen C. Stadtentwicklung und Klimaanpassung-beispielhaft dargestellt am Einzugsgebiet der Wandse, Hamburg, TuTech Verlag, Hamburg, Deutschland.
- SVERDLOVA, L. (2015): Orientierungswerte zur Abschätzung der Wirksamkeit von Dezentralen Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen - Entwicklung anhand hydrologischer Modellberechnungen, Masterarbeit am Institut für Wasserbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Deutschland.
- WONG, T.H.F., ALLEN, R., BROWN, R.R., DELETIĆ, A., GANGADHARAN, L., GERNJAK, W., JAKOB, C., JOHNSTONE, P., REEDERM., TAPPER, N., VIETZ, G., WALSH, C.J. (2013): blueprint2013 - Stormwater Management in a Water Sensitive City, Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, Australia. Journal of Hydrology 409: 637-649.

## **Synergieeffekte flussgebietsorientierter und grenzübergreifender Modellierung**

Christiane E. Pyka, Roman Breuer, Heribert Nacken

### **Zusammenfassung**

Die von der Wasserrahmenrichtlinie und der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie vorangetriebene flussgebietsorientierte Bewirtschaftung europäischer Flüsse ist nicht nur europaweit, sondern auch global anerkannt. In der Modellierung steckt dieser Ansatz jedoch noch in der Anfangsphase. Für diese Studie wurden verschiedene grenzübergreifende Projekte betrachtet und hinsichtlich ihrer modelltechnischen Arbeit analysiert. Es zeigt sich, dass die Art des Modellierungsansatzes je nach Betrachtungsfrage, Flussgebiet und den beteiligten Ländern variiert. Anhand der Analyseergebnisse konnte kein allgemeingültiges Vorgehen identifiziert werden. Allerdings ist die Akzeptanz der Modellergebnisse in grenzübergreifenden Projekten stark von politischen und gesellschaftlichen Stakeholdern geprägt. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen zudem, dass gemeinsame einheitliche Modellierungen grenzübergreifend gewünscht sind, ihre Realisierung oftmals aber erst den nächsten Schritt darstellt.

### **1. Einleitung**

Für eine flussgebietsorientierte und grenzübergreifende Modellierung gibt es zahlreiche Gründe und positive Aspekte. So verbessern sich durch einen intensiven Austausch die Datengrundlage und die Genauigkeit der Modellierung. Auch Umsetzungen im Management oder finanzielle Förderungen werden zielführender sowie wirtschaftlicher durchgeführt. Durch einen koordinierten Erfahrungsaustausch kann zudem das Problembewusstsein verbessert werden.

Nicht zuletzt existiert im Zusammenhang mit der Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) (WRRL) und der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (2007/60/EG) bereits eine globale Anerkennung der flussgebietsorientierten Bewirtschaftung (BAUWENS, et al., 2015). Diese Richtlinien empfehlen den Mitgliedstaaten eine integrierte Bewirtschaftung der Einzugsgebiete (WRRL, 2000) (HWRM-RL, 2007). So sollen im Falle einer internationalen Flussgebiets-einheit die betroffenen Länder gemeinsam für eine Koordinierung sorgen (vgl. Art. 3 Abs. 4 (WRRL, 2000)). Dabei sollen durch Aufgreifen bestehender Modelle, Werkzeuge und Ziele vorhandene Ressourcen effizient und sinnvoll genutzt werden. Eine flussgebietsorientierte Bewirtschaftung kann so zum einen Mess- und Analysemethoden vereinheitlichen, zum anderen kann der Austausch von Messdaten vereinfacht werden (IKSR, 2015).

Um die Umsetzung der WRRL im Einzugsgebiet der Maas zu gewährleisten, wurde 2002 die Internationale Maas Kommission gebildet. Sie zielt auf eine nachhaltige und integrierte Wasserbewirtschaftung ab, die die Umsetzung der WRRL und die Erstellung eines einzigen Bewirtschaftungsplanes für das gesamte Flussgebiet beinhaltet (IMK, 2006).

In der hydrologischen Modellierung hat sich ein einheitliches Vorgehen bisher noch nicht durchgesetzt. Um die Synergieeffekte einer kooperierenden Modellierung zu identifizieren, wurden für diese Studie verschiedene grenzübergreifende Projekte der Wasserwirtschaft verglichen. Abgegrenzt wird exemplarisch auf das Maaseinzugsgebiet.

Von ihrer Quelle in Frankreich bis zu ihrer Mündung in den Niederlanden ist die Maas fast 950 km lang. Das Maaseinzugsgebiet, in Abbildung 1 zu sehen, erstreckt sich über etwa 36.000 km<sup>2</sup> (BAUWENS et al., 2015).



Abb. 1 Das Maaseinzugsgebiet

Quelle: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ABassin\\_de\\_la\\_Meuse.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ABassin_de_la_Meuse.svg) Made available under Creative Commons license CC-BY-SA-3.0 via Wikimedia

Auf modelltechnischer Ebene wurde eine flussgebietsorientierte Betrachtung im Maaseinzugsgebiet erstmals 2009 mit dem AMICE-Projekt (<http://www.amice-project.eu/de/index.php>) realisiert. Die Projektarbeit erfolgte in enger Kooperation der Maas Kommission, Wasserverbänden, Gemeinden, Universitäten, Forschungsinstituten und NGOs in den vier Anrainerstaaten Deutschland, Belgien, Frankreich und den Niederlanden. Innerhalb des Projektes wurde die Anpassung der Maas an die Auswirkungen des Klimawandels betrachtet. In Folge auf AMICE wurde das Rur-Meuse-Linkage Projekt durchgeführt, welches den Fokus auf qualitative und quantitative Auswirkungen von Niedrigwasserständen auf die Maas legte. Auch hier waren die vier oben genannten Länder involviert.

Außerdem werden in dieser Studie die Erfahrungen aus der Zusammenarbeit zu FLOODWISE (<http://floodwise.nl/>) evaluiert. Das Ziel dieses Projektes war, das grenzübergreifende Hochwasserrisikomanagement zu verbessern.

## 2. Methodik

In dieser Studie werden die Vorgehensweise und Ergebnisse drei verschiedener grenzübergreifender Modellierungsprojekte im Maaseinzugsgebiet miteinander verglichen, um mögliche Synergieeffekte zu identifizieren. Eine Zusammenstellung der Methoden kann für zukünftige Projekte richtungsweisend genutzt werden.

### 2.1 Adaptation of the Meuse to the Impacts of Climate Evolutions (AMICE)

Um die Auswirkungen des zukünftigen Klimawandels auf die Maas zu identifizieren, wurden im AMICE-Projekt zwei Zeiträume betrachtet. Die nahe Zukunft von 2021-2051 und die fer-

ne Zukunft von 2071-2100. Die ersten Schritte waren die Analyse und das Zusammentragen von Literatur, um einen gemeinsamen Wissenspool anzulegen. Dafür wurde eigens eine Online-Datenbank erstellt, die von jedem Partner eingesehen und ergänzt werden kann. Bereits hier zeigten sich einige Unterschiede. Etwa zwei Drittel der Veröffentlichungen waren in französischer Sprache verfasst und nur 40 der insgesamt 800 Referenzen waren deutsch oder niederländisch (DROGUE et al., 2010). Eine genaue Analyse zeigte, dass in den meisten Fällen die bestehenden Klimadaten nicht das gesamte Einzugsgebiet abdeckten. Es zeigte sich außerdem schnell, dass die verschiedenen ländereigenen hydrologischen Szenarien meist zu komplex waren und nicht dieselben Einflussvariablen verwendet wurden, als dass diese miteinander hätten verglichen werden können (DROGUE, et al., 2010). Zwei Hauptaufgaben für die Modellierung waren daher die Erstellung von klimatischen und hydrologischen Szenarien.

Für die Klimabetrachtung in AMICE wurde der „delta change approach“ angewendet. Saisonale Trends (% für  $\Delta$ Niederschlag (P) und  $^{\circ}\text{C}$  für  $\Delta$ Temperatur (T)) wurden auf Basis von GCM-Simulationen für die Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100 von nationalen Klima- und Wetterdiensten erstellt (Abb. 2) (DROGUE et al., 2010).

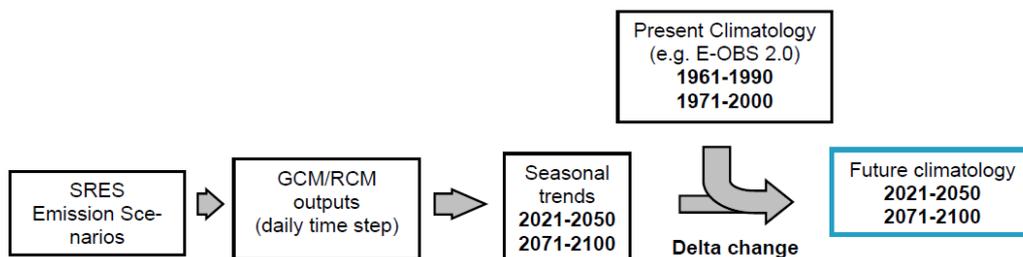


Abb. 2 Flowchart des delta change approach, welcher zur Erstellung der Klimaszenarien angewendet wurde (DROGUE, et al., 2010)

In der verwendeten Literatur wurde auf zwei mögliche Klimaänderungen hingewiesen: wärmeres und trockeneres Klima für den Süden Europas, sowie feuchteres und kälteres Klima in Nordeuropa. Da das Einzugsgebiet der Maas zu Teilen in Süd- und zu Teilen in Nordeuropa liegt, wurde das mögliche Spektrum der Klimaänderung auf beide Ansätze ausgeweitet. Auf dieser Grundlage wurden in AMICE für beide Perioden die zwei Zukunftsszenarien „wet“ und „dry“ generiert (DROGUE et al., 2010).

Zunächst wurden beide Szenarien in nationalen Klimaszenarien umgesetzt. Tabelle 1 beschreibt die jeweilige Charakteristik dieser nationalen Berechnungen.

Tab. 1 Hauptcharakteristiken der nationalen Klimaszenarien (DROGUE, et al., 2010):

	SRES scenarios	Climate experiment or model	Data provider and contact person	Downscaling method	Source of data	Type of simulation	Time period for the control run
French part of the basin	A2/A1B	ARPEGE-climat v4.6	Météo-France (L. Labbé)	Bias correction (Q-Q plot)	Météo France	Transient simulation	1961-1990
Walloon part of the basin	A1B/ A2/B1/B2	CCI-HYDR Perturbation Tool	KULeuven (P. Willems)	statistical	Royal Institute Belgium		1961-1990
German part of the basin	A1B	WETTREG (wet scenario) CLM (dry scenario)	DWD (T. Deutschländer)	dynamical (CLM) & statistical (WETTREG)	WETTREG: Meteo Research pp Umweltbundesamt CLM: MPI-M-M/MaD pp BMBF	Transient simulation	1971-2000
Dutch and Flemish parts of the basin	A2/B1	PRUDENCE	KNMI	dynamical & statistical	KNMI	Transient	1961-1990

Neben den nationalen Szenarien und um den Durchfluss an den Grenzen flussabwärts möglichst konstant zu halten, wurde zusätzlich ein gemeinsames transnationales Szenario entwickelt, welches das gesamte Maaseinzugsgebiet abbildet. Dabei sollten die nationalen Ausprägungen und das zugehörige Einzugsgebiet als Einflussfaktor weiterhin berücksichtigt werden. Daher erhielten die nationalen Niederschlag- und Temperatur-Trends eine Wichtung, welche in Abhängigkeit der Teilgebietsgröße ermittelt wurde (Tab. 2). Die Ergebnisse wurden anschließend für das transnationale Szenario aufsummiert. (DROGUE et al., 2010)

Tab. 2 Wichtungskoeffizienten der nationalen Trends zur Erstellung eines transnationalen Szenarios (DROGUE et al., 2010):

	Drainage area (km <sup>2</sup> )	Weighting coefficient
France	10.120	0,31
Walloon	10.880	0,33
Flanders & Netherlands	8.662	0,26
Germany	3.338	0,10
<b>Transnational Meuse</b>	<b>33.000</b>	<b>1,0</b>

Ein Vergleich der nationalen Trends mit PRUDENCE RCM Simulationen (DE WIT et al., 2007) zeigte eine zufriedenstellende Übereinstimmung (DROGUE et al., 2010).

Nachdem die Klimaszenarien vorhanden waren, verwendete jedes Land die eigenen hydrologischen Niederschlags-Abfluss-Modelle, um einen kontinuierlichen Abfluss zu simulieren. Die methodische Entscheidung, die nationalen Modelle zu verwenden, zielte darauf ab, die bestehenden Methoden und das Wissen innerhalb der Länder zu bewahren. Zudem war es eine zeitkritische Entscheidung. Die Ergebnisse waren innerhalb der verschiedenen Teileinzugsgebiete variabel. Diese wurden anschließend mit einer vorherigen Studie verglichen, wobei eine ausreichende Übereinstimmung der durchschnittlichen Durchflüsse festgestellt wurde. (BAUWENS et al., 2015)

Auch die hydrologischen Szenarien wurden auf der Basis entwickelt, das nationale Wissen zu wahren. So wurde ein guter gesamtheitlicher Ansatz entwickelt, der von den beteiligten

Ländern akzeptiert werden konnte. Methodisch wurde sich auf hydrologische Einflussvariablen geeinigt. Für Niedrigwasser wurde der MAM7 (mean annual 7-day minimum flows), für Hochwasser der Qdx (annual daily maximum discharge), sowie der Qhx (annual hourly maximum discharge) für verschiedene Wiederkehrintervalle gewählt. Im Anschluss wurden individuelle Extremwertverteilungen auf die gemessenen und simulierten Maximal-/Minimalwerte angepasst (Tab. 3). (DROGUE et al., 2010)

Tab. 3 Notwendige Methoden zur Darstellung und Berechnung der hydrologischen Einflussvariablen (DROGUE et al., 2010):

	Station	Qhx100		Qdx100		MAM7	
		Statistical law	Method of parameters estimation	Statistical distribution	Method of parameters estimation	Statistical law	Method of parameters estimation
Meuse	Saint-Mihiel	Gumbel	Maximum-Likelihood	Not calculated		Lognormal	Maximum-Likelihood
Meuse	Stenay	Gumbel	Maximum-Likelihood	Lognormal		Maximum-Likelihood	
Meuse	Montcy-notre-Dame	Gumbel	Maximum-Likelihood	Lognormal		Maximum-Likelihood	
Meuse	Chooz	Gumbel	Maximum-Likelihood	Not calculated		Lognormal	Maximum-Likelihood
Vesdre	Chaufontaine	Weibull	Maximum-Likelihood	Weibull/ gamma inverse/gamma	Maximum-Likelihood	Weibull /Gamma	Maximum-Likelihood
Lesse	Gendron	Log-normale/ gamma	Maximum-likelihood	Log-normale	Maximum-likelihood	Weibull	Maximum-Likelihood
Meuse	Sint Pieter	Gumbel	Maximum-Likelihood	Gumbel	Maximum-Likelihood	Lognormal	Gumbel
Rur	Stah	Gumbel	Maximum-Likelihood	Gumbel	Maximum-Likelihood	Lognormal	Maximum-Likelihood
Niers	Goch	Gumbel	Maximum-Likelihood	Gumbel	Maximum-Likelihood	Lognormal	Maximum-Likelihood

Da die hydrologischen Szenarien auch in der hydraulischen Modellierung berücksichtigt wurden, war es im AMICE Projekt wichtig, ähnliche Werte zwischen den Ländern zu vereinbaren und so gleichzeitig die Anzahl der Simulationen zu begrenzen (DROGUE, et al., 2010). Auf einer gemeinsamen Konferenz wählten die AMICE-Partner daher nur die extremen Werte aus: das feuchte Klimaszenario für Hochwasser- und das trockene Szenario für Niedrigwasserabflüsse (DROGUE et al., 2010).

## 2.2 Rur-Meuse-Linkage

Der Fokus des Rur-Meuse-Linkage Projektes lag auf den Auswirkungen von klimawandelinduzierten Niedrigwasserständen der Maas. Dabei sollte u.A. der Einfluss der Rur auf die Maas untersucht werden. Hier waren ebenfalls die Partnerländer Frankreich, Belgien, Niederlande und Deutschland beteiligt. Die Modellierung wurde allerdings auf die Partnerländer Deutschland und Niederlande beschränkt. Ausgehend von AMICE waren keine neuen Niederschlags-Abfluss-Modellierungen notwendig, da die Ergebnisse bereits vorhanden waren. Durch eine gemeinsame Szenarienauswahl wurde sich hierbei nur auf das transnationale klimatische und hydrologische Szenario aus dem oben beschriebenen AMICE Projekt beschränkt. Neben der Quantität wurde zudem die Qualität auf Basis von Wassertemperatur, Sauerstoff- und Chlidgehalt, des Abflusses betrachtet.

Die Ergebnisse der Modellierungen für die Rur in Deutschland gingen als Eingangsparameter in die niederländischen Modelle der Maas ein.

## 2.3 FLOOD-WISE

Das Projekt FLOOD-WISE diente dem Erfahrungsaustausch zum Hochwasserrisikomanagement. Das Hauptziel war die Verbesserung des grenzübergreifenden Hochwasserrisikomanagements basierend auf Erfahrungen in den sechs europäischen Flussgebieten: Maas, Rur, Elbe, Western Bug, Sotla und Szamos (FLOOD-WISE). Exemplarisch wird im Folgenden auf die Arbeit im Rureinzugsgebiet eingegangen. In einem ersten Schritt wurde der Status Quo bezüglich bestehender Modelle evaluiert. Für den niederländischen Teil der Rur wurde kein N-A-Modell verwendet, sondern das hydraulische 1D Modell SOBEK zur Berechnung von Wasserständen und der Erstellung von Überflutungsflächenkarten. Input für das Modell war eine Design-Hochwasserwelle mit einem 100-jährigen Wiederkehrintervall.

Das deutsche Gebiet der Rur wurde mittels zweier verschiedener hydrologischer Modelle abgebildet. Das Gebiet der Inde und Vicht wurde mittels NASIM simuliert, während für den restlichen Teil N-A-Modelle mithilfe von ProVos entwickelt wurden.

In Tabelle 4 werden die unterschiedlichen Ansätze gegenüber gestellt. So wurde für den niederländischen Teil kein lateraler Inflow berechnet, da dieser als nicht relevant gilt. Hingegen wurde er in dem deutschen Gebiet der Rur berücksichtigt. (BARTUSSECK & ROSE 2011)

Tab. 4 Übersicht der in FLOOD-WISE verwendeten Modelle für das Rureinzugsgebiet (BARTUSSECK & ROSE, 2011):

	Niederlande	Deutschland
Modell	SOBEK (1D hydraulisch), kein NA-Modell	ProVos und NASIM
Lateraler Inflow	Nicht berechnet	berechnet
Kopplung	Nein. Obere Randbedingung ist der Pegel Stah an der D-NL-Grenze	NASIM wurde gekoppelt, indem Abflusszeitreihen verwendet werden.
Input	Design-Hochwasser (HQ100) am Pegel Stah	Synthetischer Niederschlag, Temperatur und Evapotranspiration

## 3. Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Ergebnisse der Studie

In den drei vorgestellten Projekten wurden jeweils die in den Ländern bestehenden Modelle verwendet. Einerseits geschah dies aus strategischen Gründen, andererseits aufgrund von mangelnder Zeit. Im AMICE-Projekt unterschieden sich die Ergebnisse der hydrologischen Modelle in den einzelnen Teileinzugsgebieten, aber viele Faktoren waren konsistent zu vorangegangenen Studien (BAUWENS et al., 2015). Die Verwendung der nationalen Modelle wurde insbesondere von den lokalen Stakeholdern geschätzt, wodurch sich wiederum die Akzeptanz der Ergebnisse verbesserte (BAUWENS et al., 2015). Hier wird eine gemeinsame Erstellung eines einzelnen Modells als der nächste Schritt gesehen, der den Umfang von AMICE überstiegen hätte.

Als ein Folgeprojekt von AMICE ist das Rur-Meuse-Linkage Projekt bereits als ein positives Ergebnis einer grenzübergreifenden Arbeit zu sehen. Die verwendeten Szenarien und Daten waren die Ergebnisse von AMICE und obwohl neue Partner involviert waren, bestand die Akzeptanz der Modellierungen. So mussten für eine neue Fragestellung keine neuen Modelle und Simulationen erstellt werden, was den Arbeitsaufwand erheblich verringerte.

Die Entwicklung des transnationalen Klimaszenarios vereinheitlichte die unterschiedlichen Modellierungen. Aus Sicht der einzelnen Länder bleiben jedoch die nationalen Szenarien wahrscheinlicher und somit auch relevanter in der Betrachtung.

Im FLOOD-WISE Projekt wurden nicht nur nationale Modelle verwendet, sondern auch Modelle unterschiedlicher Art. Die Ausgangsparameter der vorgeschalteten Modellgebiete konnten daher nicht in weiter flussabwärts gelegene Gebiete implementiert werden. So unterschied sich unter Anderem das in den Niederlanden angenommene  $HQ_{100}$  von dem, welches von den deutschen Modellen für den Pegel Stah berechnet wurde. Außerdem konnte durch die statistische Annahme eines HQs keine Klimaänderung im niederländischen Modell explizit berücksichtigt werden (BARTUSSECK & ROSE 2011).

Generelle Schwierigkeiten, die bei einer transnationalen, flussgebietsorientierten Modellierung auftreten können sind:

- Unterschiedliche Ansätze und Standards
- Flussgebiete und Interessen innerhalb angrenzender Länder unterscheiden sich stark
- Unterschiedliche Definitionen (z.B. Wiederkehrintervalle und korrespondierende Wahrscheinlichkeit von Hochwasserereignissen)
- Unterschiede in den Datensätzen
  - Maßstäbe, Auflösung, Menge, Zeitraum, Qualität
- Datenfreigabe
- Ergebnisunterschiede

In den betrachteten Projekten wurden jeweils bestehende nationale Modelle verwendet. Dies führte allgemein zu einer besseren Akzeptanz, jedoch können technische Grenzen die Handlungsspielräume einschränken. Für die grenzübergreifende Modellierung war daher insbesondere die gemeinsame Szenarienauswahl von großer Wichtigkeit.

Die wichtigsten Synergieeffekte eines transnationalen Ansatzes sind neben der Wahl der Modelle jedoch eher sozial geprägt. So werden von vielen Partnern als prägnante Vorteile die grenzübergreifende Kommunikation und das Kennenlernen der Ansprechpartner genannt. Eng damit verbunden sind auch der Erfahrungsaustausch und das Kennenlernen von Methoden, sowie die damit einhergehende Wissenserweiterung. Durch den Einbezug verschiedenster Stakeholder in AMICE und Rur-Meuse-Linkage verbesserte sich zudem die Bewusstseinsbildung in Gesellschaft und Politik, wodurch sich schlussendlich der Datenaustausch (auf informeller Ebene) verbesserte. Ebenso war der Einstieg in weiterführende grenzübergreifende Fragestellungen leichter. Generell muss der Einbezug von Behörden und Politik in einem grenzübergreifenden Projekt/Modell stärker erfolgen als bei einer kleinräumigen oder nationalen Betrachtung.

### 3.2 Fazit

Die Analyse der drei exemplarisch ausgewählten Projekte verdeutlicht, dass eine flussgebietsorientierte Modellierung auch funktionieren kann, wenn bereits bestehende Modelle kombiniert werden. Die Qualität der gemeinsamen Arbeit und Modellierung hängt jedoch teilweise von den beteiligten Ländern, deren politischen Beziehungen und den verwendeten Modellen ab. Bisher dienten im Maaseinzugsgebiet gemeinsame Projekte primär als erste Kontaktaufnahme und dem Austausch. Woraus sich mittlerweile neue Arbeitsgruppen und Projekte ergeben haben, in denen ebenfalls die bestehenden nationalen Modelle verwendet wurden. Einheitliche flussgebietsübergreifende Modelle werden aktuell als nächster Schritt gesehen. Dabei bleibt die Einigung auf ein gemeinsames Modell weiterhin problematisch. Insbesondere, da bereits gut kalibrierte und umfangreiche nationale Modelle bestehen und ein Neuanfang insbesondere hinsichtlich der Zeit kritisch betrachtet wird. Zusätzlich bleibt zu beachten, dass nationalen Ausprägungen unterschiedlich ausfallen und davon auszugehen ist, dass die bestehenden Modelle als beste Lösung für diesen Betrachtungsraum gelten. Je nach transnationaler Fragestellung bleibt es aber weiterhin wünschenswert ein gemeinsames Modell zu erstellen, um bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen. Besonders da in vielen anderen Einzugsgebieten eine gemeinsame Modellierung bereits erfolgreich durchgeführt wurde.

### Literatur

- BARTUSSECK, S., & ROSE, T. (2011). Sub-Report: Inventory flood risk assessment of the river Rur in the Netherlands and Germany. Projektreport.
- BAUWENS, A., DEGRÈ, A., DERAEDT, D., DÖRING, R., DROGUE, G., HUBER, N. P., et al. (März 2015). International assessment of future low-flow regimes and their impact on three water-related sectors in the Meuse basin - a collaborative approach. (I. A. Research, Hrsg.) International Journal of River Basin Management, 13(1), S. 123-135.
- DE WIT, M., HURK, V. D., B., WARMERDAM, P., TORFS, E., ROULIN, E., et al. (2007). Impact of climate change on low-flows in the River Meuse. Climate Change(82), S. 351-372.
- DROGUE, G., FOURNIER, M., BAUWENS, A., BUITEVELD, H., COMMEAUX, F., DEGRÈ, A., et al. (2010). Analysis of climate change, high-flows and low-flow scenarios on the Meuse basin.
- FLOOD-WISE. (kein Datum). About FLOOD-WISE. Abgerufen am 02. 11 2015 von Floodwise: <http://floodwise.nl/about-floodwise/>
- HWRM-RL. (23. Oktober 2007). Richtlinie 2007/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Amtsblatt der Europäischen Union(L 288), 27-34.
- IKSR, I. K. (2015). IKSR: Geschichte. (IKSR, Herausgeber) Abgerufen am 14. Juli 2015 von <http://www.iksr.org/de/internationale-zusammenarbeit/ueberuns/geschichte/index.html>
- IMK. (2006). Übereinkommen - CIM-IMC-IMK. (IMK, Hrsg.) Abgerufen am 14. Juli 2015 von <http://www.cipm-icbm.be/page.asp?id=46&langue=DE>

WRRL. (22. Dezember 2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. (22). Official journal of the European Communities.



## **Abbildung räumlicher Einzugsgebiets-Eigenschaften mit konzeptionellen Modellen**

Rita Ley, Hugo Hellebrand, Markus C. Casper

### **Zusammenfassung**

Konzeptionelle hydrologische Modelle mit unterschiedlichen Modellstrukturen werden häufig zur Untersuchung und Vorhersage von Einzugsgebietsverhalten genutzt. Eine direkte Verbindung zwischen konkreten konzeptionellen Modellstrukturen und Gebietscharakteristiken kann viele Fragestellungen der Hydrologie bedienen. Für 100 Einzugsgebiete aus dem deutschen Mittelgebirgsraum werden aus 12 unterschiedlichen Modellstrukturen die jeweils besten Modellstrukturen identifiziert und Verbindungen zwischen konzeptionellen Modellstrukturen und Gebietscharakteristiken gesucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Einzugsgebiete mit den jeweils gleichen besten Modellstrukturen weder einen deutlichen räumlichen Zusammenhang noch klare Verbindungen zu mittleren hydroklimatische und physiogeografische Gebietseigenschaften aufweisen. Eine direkte Verbindung zwischen Modellstrukturen und Gebietscharakteristiken kann nur bedingt hergestellt werden.

### **1. Einleitung**

Modellstrukturen werden als formalisierte Repräsentationen des Systems „Einzugsgebiet“, seiner Organisation und Verbindungen angesehen, die Annahmen über das hydrologische Verhalten eines Einzugsgebietes unterstützen (SAVENIJE, 2009; BLÖSCHL et al., 2013). Geeignete Modellstrukturen sollten Einzugsgebiets-Charakteristiken beschreiben und abflussrelevante Ähnlichkeiten oder Differenzen zwischen Einzugsgebieten (EZG) herausstellen.

Die Hauptfrage dieser Studie lautet: Lassen sich mesoskalige Einzugsgebiete durch konzeptionelle Modellstrukturen charakterisieren? Eine Verbindung zwischen Einzugsgebietscharakteristiken und konzeptionellen Modellstrukturen könnte wichtige Themen der Hydrologie bedienen:

- Charakterisierung von Einzugsgebieten
- Identifikation wichtiger Abflussprozesse
- Klassifikation von Einzugsgebieten
- Regionalisierung - Modellierung unbeobachteter Einzugsgebiete
- Auswahl geeigneter Modellstrukturen

Die Anwendung verschiedener konzeptioneller Modelle ist eine gängige Methode Gebietscharakteristiken und regionale Muster geeigneter Modellstrukturen zu identifizieren und zu beschreiben. So zeigen z.B VAN ESSE et al., (2013) und WAGENER & MCINTYRE (2012) Zusammenhänge zwischen Modellstruktur und Gebietscharakteristiken für Frankreich bzw. für die östliche Hälfte der USA und BUYTAERT & BEVEN (2011) verweisen auf die unterschiedliche Eignung konzeptioneller Modelle für ein Einzugsgebiet in den ecuadorianischen Anden. Auch CLARK et al. (2011) und FENICIA et al. (2014) zeigen den Zusammenhang zwischen der Abflussdynamik kleiner EZG (47 km<sup>2</sup> bzw. <5 km<sup>2</sup>) und unterschiedlicher Modellstrukturen.

Ziel dieser Studie ist, die Eignung von 12 konzeptionellen Modellstrukturen für die Beschreibung von 100 mesoskaligen EZG in einem vergleichsweise kleinen Untersuchungsgebiet im deutschen Mittelgebirgsraum im Sinne der oben genannten Frage zu analysieren.

## 2. Untersuchungsgebiet und Daten

Das Untersuchungsgebiet umfasst 100 oftmals benachbarte und geschachtelte Einzugsgebiete (EZG) in Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg (Abbildung 1). Die EZG sind zwischen 10 und 1826 km<sup>2</sup> groß, wobei 81 EZG kleiner als 400 km<sup>2</sup> und 7 EZG größer als 1000 km<sup>2</sup> sind. Die großen EZG haben mehrere Oberlieger-EZG und umfassen häufig den Gesamtlauf eines Gewässers bis zur Mündung.

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich vom Rheinischen Schiefergebirge über das Saar-Nahe-Bergland und das Oberrheinische Tiefland bis in den nördlichen Schwarzwald und das nördliche Schichtstufenland Baden Württembergs. Damit umfasst es auf vergleichsweise kleinem Raum eine Vielzahl von Landschaften. Kein EZG zeigt einen deutlichen Karst-Einfluss. Der mittlere Niederschlag variiert zwischen 540 mm/a im Oberrheinischen Tiefland bis zu 1730 mm/a im nördlichen Schwarzwald. Alle EZG sind ländlich geprägt, der Bebauungsgrad liegt meistens deutlich unter 10 %, der Waldanteil variiert zwischen 0 und 95 %.

Für die Untersuchung liegen stündliche Daten der Abflüsse, Gebietsniederschläge und Temperatur für den Zeitraum von Anfang 1996 bis Ende 2003 vor.

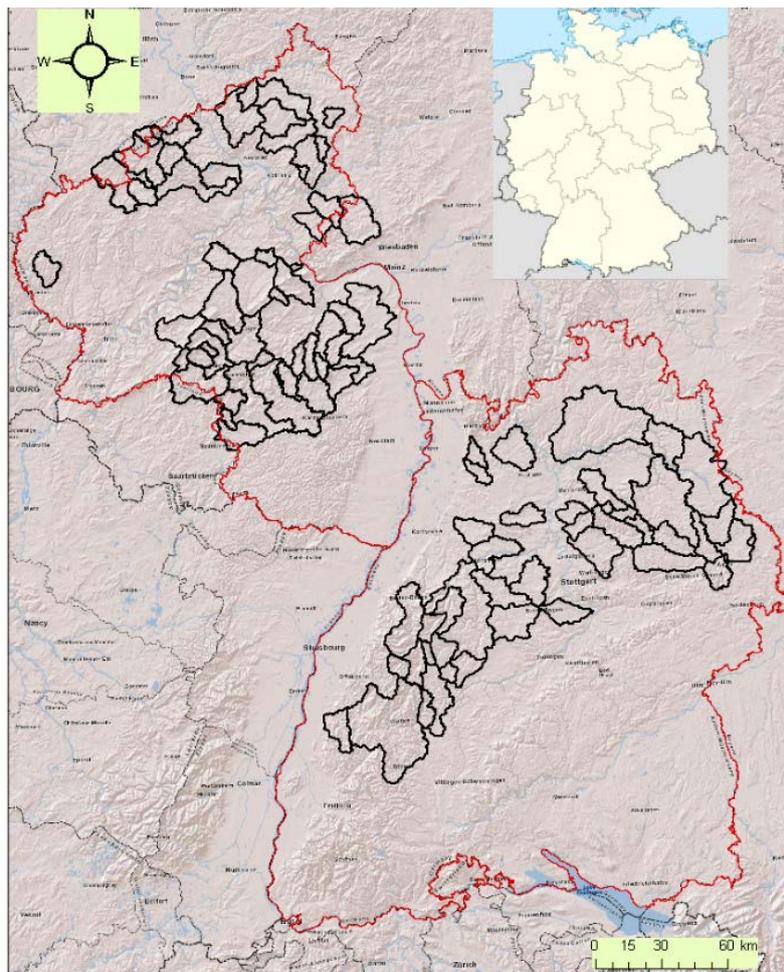


Abb. 1: Untersuchungsgebiet: 100 Pegel-Einzugsgebiete in Südwest-Deutschland. Von großen, geschachtelten Einzugsgebieten sind nur die Oberlieger-Gebiete in voller Größe sichtbar.

### 3. Methoden

#### 3.1 Kalibrierung und Validierung

Einhundert Pegel-Einzugsgebiete (EZG) wurden mit je 12 Modellstrukturen aus dem SUPERFLEX Modellrahmen (FENICIA et al., 2011) kalibriert. Der SUPERFLEX Modellrahmen ist eine vielseitige und robuste Plattform für hydrologische Modellierungen und Hypothesentests im Einzugsgebietsmaßstab. Die hier genutzten 12 Modellstrukturen entsprechen im Wesentlichen den in FENICIA et al. (2014) vorgestellten und ausführlich beschriebenen Strukturen. Sie weisen unterschiedliche Komplexitäten auf: M01 ist mit einem Speicher und zwei zu kalibrierenden Parametern das einfachste, M12 mit 4 Speichern und 8 Parametern das komplexeste Modell. Durch unterschiedliche Konzepte (Anordnung und Verbindung der Speicher) ist die Modellkomplexität von M01 bis M12 nicht linear ansteigend.

Alle Kalibrierungen wurden mit einer multi-start Quasi-Newton Methode mit 30 zufälligen Starts und einer gewichteten Kleinste-Fehlerquadrate-Methode (KAVETSKI et al., 2006; FENICIA et al., 2014) durchgeführt. Alle EZG wurden mit den gleichen Modellstrukturen und der gleiche Routine kalibriert.

Ein Modell besteht aus einer Modellstruktur, den kalibrierten Parametern und Informationen über das EZG, für das die Parameter kalibriert sind.

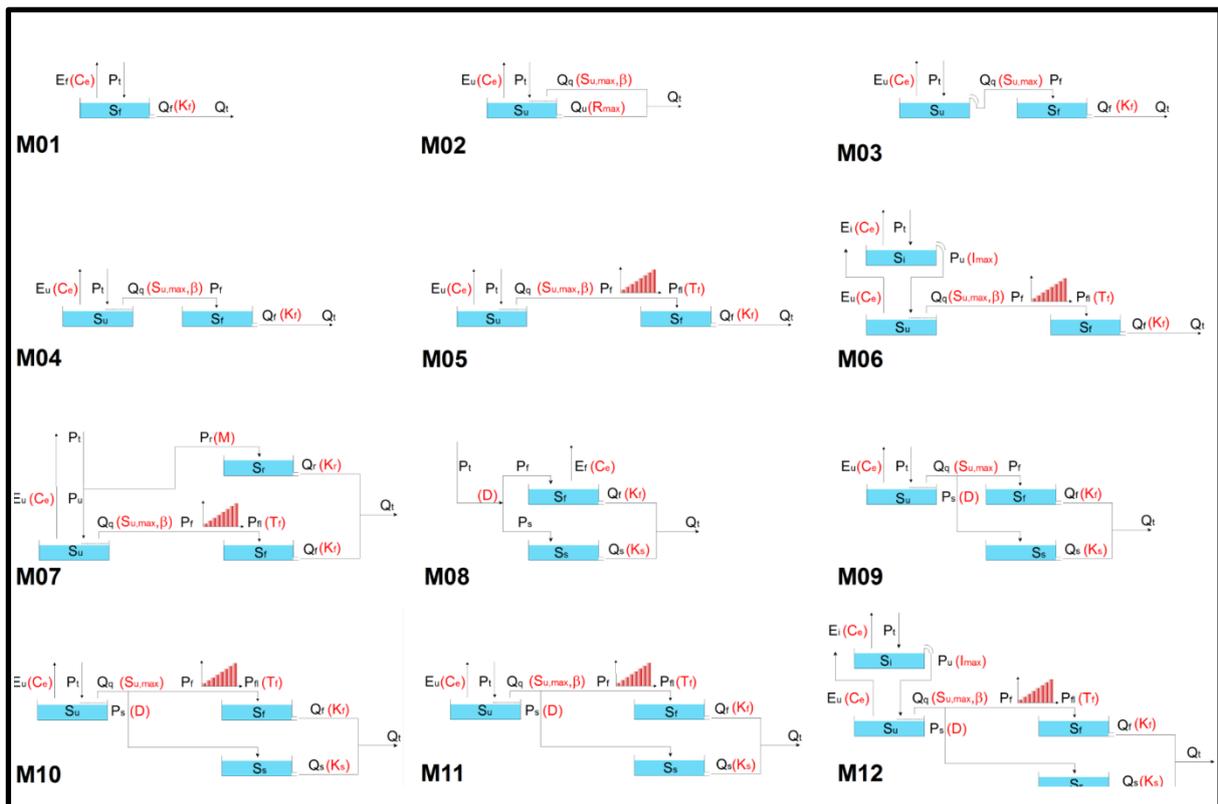


Abb. 2: 12 Modellstrukturen (SUPERFLEX), verändert nach FENICIA et al., (2014). Die zu kalibrierenden Modellparameter sind rot eingetragen. D: Aufteilung zwischen schnellem und langsamem Speicher,  $E(C_e)$ : Evapotranspiration, I: Interzeption, K: Speicherkoeffizient,  $P_t$ : Gesamtniederschlag,  $Q$ : Abfluss, S: Speicher,  $T_r$ : Verzögerungsfaktor,  $\beta$ : Power Funktion, f: schnell, max: maximum, s: langsam, t: total, u: ungesättigt.

Von den stündlichen Daten wird das erste Jahr als Einschwingzeit, die folgenden 3,5 Jahre für die Kalibrierung und die anschließenden 3,5 Jahre für die Validierung genutzt.

### 3.2 Modellgüte

Die Modellgüte wird hauptsächlich über Vergleiche der gemessenen und simulierten Abflüsse mittels einer Flow Duration Curve (FDC, Abflussdauerlinie) und zusätzlich mit dem Nash-Sutcliffe-Koeffizienten (NSE, NASH & SUTCLIFFE, 1970) beurteilt.

Die FDC beschreibt die Höhe, Häufigkeit und Variabilität von Abflüssen. Für die Modellevaluation wird sie in 4 Abschnitte unterteilt, die jeweils wichtige Aspekte des Abflussverhaltens beschreiben und mit so genannten Signature Indizes bewerten (FHV, FMV, FMS und FLV, Abbildung 3). Jeder Signature Index beschreibt die Abweichung zwischen der beobachteten und simulierten FDC als prozentuale Abweichung relativ zur jeweiligen beobachteten Abflusshöhe.

LEY et al. (2015) zeigen die Vorteile der Signature Indizes für die Modellevaluation im Vergleich zu hydrologischen und statistischen Gütemaßen wie dem NSE. Signature Indizes ermöglichen eine fundierte Beurteilung von Modellergebnissen unabhängig von Sensitivitäten und Schwächen hydrologischer oder statistischer Gütemaße.

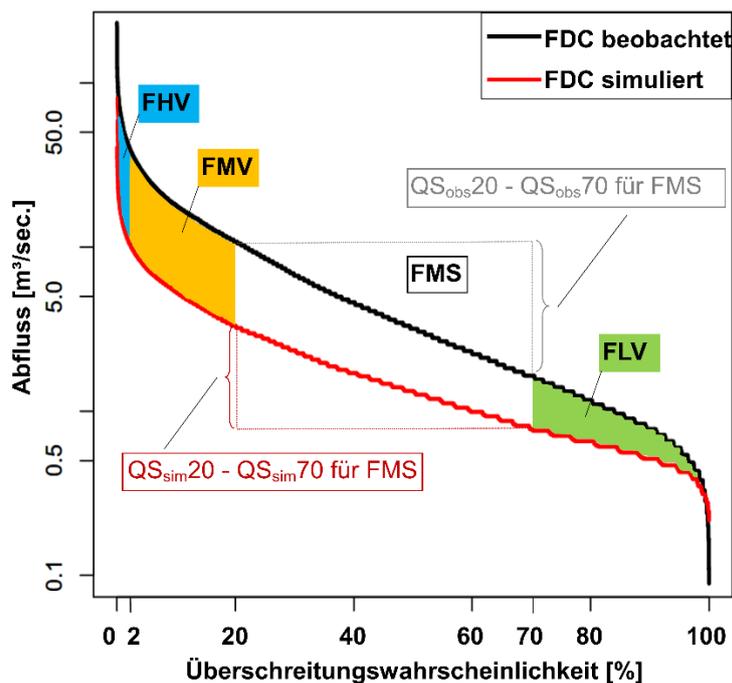


Abb. 3: FDC mit 4 Signature Indizes, die die Differenz zwischen beobachtetem und simuliertem Abfluss beschreiben: FHV: Reaktion auf hohe Niederschläge, FMV: Reaktion auf starke Niederschläge, FMS: Reaktivität des Gebietes und FLV: Basisabfluss.

Für den Vergleich der gesamten FDC wird ein Wert aus der Summe der Signature Indizes gebildet (1). Die Addition der absoluten Werte verhindert den Ausgleich von Über- und Unterschätzungen in unterschiedlichen Teilen der FDC.

$$\text{SUM} = |\text{FHV}| + |\text{FMV}| + |\text{FMS}| + |\text{FLV}| \quad (1)$$

Als Summenkurve berücksichtigt die FDC nicht das Timing der Abflüsse. Durch die zusätzliche Berücksichtigung des NSE werden auch Simulationen mit deutlichem Zeitversatz erkannt.

### 3.3 Auswahl akzeptabler und bester Modelle

Da in dieser Studie geeignete Modellstrukturen je EZG gesucht werden, werden nur Modelle mit einer akzeptablen Performanz berücksichtigt. Akzeptabel sind die Modelle mit einem NSE von mindestens 0,65 und einem Maximalwert SUM von 70. Durch die Beschränkung auf einen Mindestwert für NSE wird ausgeschlossen, dass Simulationen mit schlechtem Timing aber zufällig guter FDC berücksichtigt werden. Vergleiche der Abflussganglinie zeigen, dass die akzeptablen Modelle wenig bis keinen Zeitversatz zeigen.

Aus den akzeptablen Modellen wird für jedes EZG ein bestes Modell bestimmt: das Modell mit dem kleinsten Wert für SUM (1). Abbildung 4 zeigt als Beispiel vier akzeptable Modelle des EZGs Abentheuer mit ihren SUM, Signature Indizes und FDCs. Die FDCs zeigen für alle Modelle eine akzeptable Anpassung. Die Unterschiede zwischen den FDCs der verschiedenen Modelle werden durch die Signature Indizes und SUM deutlich: das Modell basierend auf M04 zeigt für fast alle Signature Indizes die niedrigsten Werte, und den niedrigsten Wert für SUM. M04 ist für das EZG Abentheuer am besten geeignet.

Für EZG mit nur einem akzeptablen Modell wird dieses Modell als bestes angesehen.

Diese besten Modelle beziehen sich nur auf die 12 genutzten Modellstrukturen, andere, besser geeignete Modellstrukturen sind damit nicht ausgeschlossen.

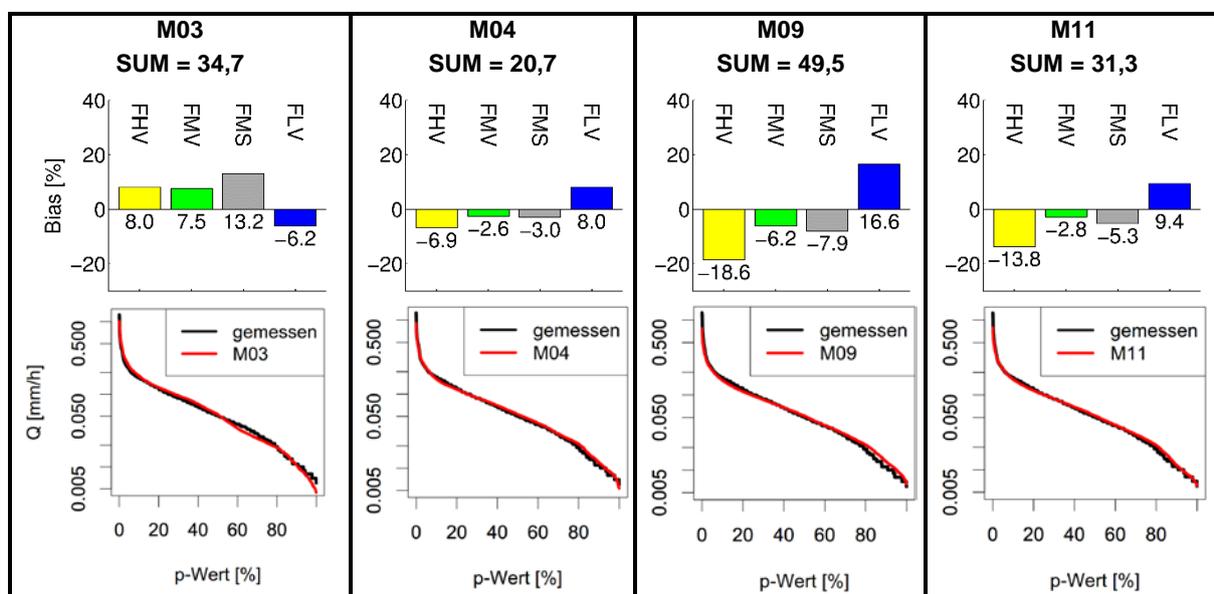


Abb. 4: Vier akzeptable Modelle des EZG Pegel Abentheuer mit ihren Werten für SUM, ihren Signature Indices und ihren FDCs.

#### 4. Ergebnisse

Die Signature Indizes und Nash-Sutcliffe Koeffizienten für alle Modelle im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum zeigen jeweils eine gute Übereinstimmung der Gütemaße und bestätigen die Qualität der Kalibrierung. Für die weitere Betrachtung werden die Werte aus dem Kalibrierungszeitraum genutzt.

Die Kalibrierung von 100 EZG mit 12 Modellstrukturen führt zu 1200 Modellen, von denen 511 eine akzeptable Performanz ( $NSE > 0,65$  und  $SUM < 70$ ) aufweisen.

Von den 100 EZG haben:

- 16 EZG kein akzeptables Modell, für diese EZG scheinen die untersuchten Modellstrukturen nicht geeignet zu sein.
- 5 EZG genau ein akzeptables Modell (Modellstrukturen 4, 7 und 12)
- 79 EZG zwischen 2 und 11 akzeptable Modelle

Die Anzahl der akzeptablen Modelle je EZG (Abbildung 5a) zeigt, dass die Modellstrukturen auf unterschiedliche EZG reagieren. Neben 5 EZG mit nur einer akzeptablen Modellstruktur weisen 16 EZG 8 akzeptable Modellstrukturen auf. Für kein EZG führen alle Modellstrukturen zu akzeptablen Modellen.

Die Anzahl akzeptabler Modelle je EZG und je Modellstruktur (Abbildung 5 b) zeigen eine differenzierte Abbildung der EZG durch die Modellstrukturen. Die sehr einfachen Strukturen M01 und M02 (Abbildung 2) ergeben keine bzw. nur sehr wenige akzeptable Modelle (Abbildung 5b). Die meisten akzeptablen Modelle werden für die komplexen Strukturen M11 und M12 identifiziert. Jedoch stellt keine Modellstruktur ein akzeptables Modell für alle 84 EZG.

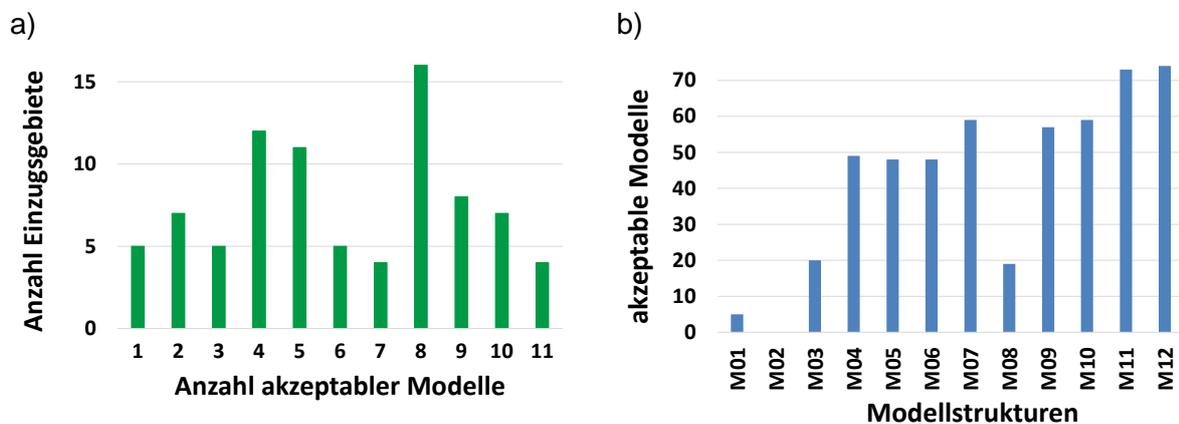


Abb. 5: Anzahl der akzeptablen Modelle je EZG (a) und je Modellstruktur (b).

Für alle EZG mit mehr als einem akzeptablen Modell verweist der kleinste Wert für SUM (1) auf das jeweils am besten geeignete Modell; für EZG mit nur einem akzeptablen Modell wird dieses Modell als bestes angenommen. In 7 Fällen sind die Unterschiede zwischen Modellen eines EZG sehr gering (Differenz  $SUM < 1,0$ ), so dass für diese EZG zwei beste Modelle identifiziert werden können. Da diese zweitbesten Modelle das Gesamtergebnis nicht beeinflussen, wird auf ihre Betrachtung hier verzichtet.

Modellstrukturen, die sich nur durch je einen zusätzlichen Parameter unterscheiden, ohne das Modellkonzept zu verändern (Strukturen M04 und M05 und M06, sowie M09 und M12,

sowie M11 und M12), ergeben identische Ergebnisse wenn die zusätzlichen Modellparameter kaum oder nicht genutzt werden und damit überflüssig sind. In diesen Fällen wird die einfachere Modellstruktur als beste Modellstruktur angenommen.

Die besten Modelle haben mit einer durchschnittliche SUM von 36 (Werte zwischen 11 und 68) und einen mittleren NSE von 0.74 (Werte zwischen 0,65 und 0,89) insgesamt eine zufriedenstellende Performanz.

Die Häufigkeiten der besten Modelle je EZG (Abbildung 6) zeigt die unterschiedliche Eignung der Modellstrukturen für das Untersuchungsgebiet. Die Modellstrukturen M01, M02 und M08 sind für keines der untersuchten EZG am besten geeignet. Die komplexeren Modellstrukturen M07, M11 und M12 (Abbildung 2) mit je 7 bzw. 8 Modellparametern zeigen für insgesamt 54 EZG die besten Ergebnisse. Daneben sind die recht einfachen Modellstrukturen M03 und M04 (3 bzw. 4 Parameter) für 20 EZG am besten geeignet. Diese Differenzierung kann auf eine Verbindung zwischen Modellstrukturen und Einzugsgebietscharakteristiken hinweisen.

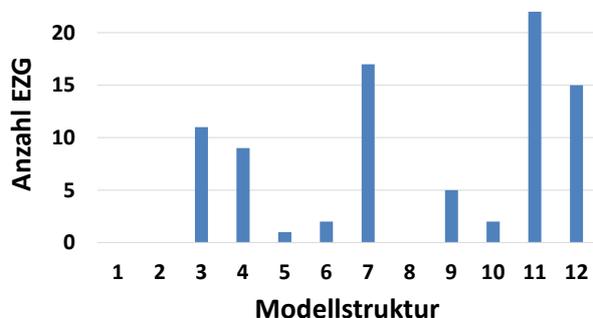


Abb. 6: Anzahl der besten Modellstrukturen je EZG.

Die räumliche Lage der EZG mit gleichen besten Modellstrukturen bzw. ohne akzeptable Modellstrukturen zeigt nur wenig benachbarte EZG mit der gleichen besten Modellstruktur (Abbildung 7). Auch die großen, geschachtelten EZG zeigen kein einheitliches Bild. Eine räumliche Aggregation von EZG mit gleichen besten Modellstrukturen muss verneint werden, die Lage im gleichen Naturraum scheint nur wenig Einfluss auf die am besten geeigneten Modellstrukturen zu haben.

Auch der Vergleich bester Modellstrukturen mit mittleren Gebietseigenschaften, dem Klima und dem Abflussverhalten der jeweiligen EZG zeigt nur wenige Zusammenhänge (Abbildung 8). Lediglich die EZG mit bester Modellstruktur M03 können als feucht mit wenig Speichermöglichkeiten, hohen Hangneigungen, hohen Feuchteindizes und hohen Abflussbeiwerten umfassend beschrieben werden. Die Modellstruktur M04 scheint für EZG mit Gebietsflächen unter 300 km<sup>2</sup> geeignet zu sein und die Modellstrukturen M12 und evtl. M09 für das Untersuchungsgebiet durchschnittliche Abfluss- und Gebietseigenschaften. Die Aussage bezüglich EZG mit bester Modellstruktur M09 ist insofern unsicher, da diese Struktur nur für 5 EZG als beste ausgewiesen wird. Alle übrigen besten Modellstrukturen zeigen keine Korrelation zu mittleren Abfluss- und Gebietseigenschaften. Die mittleren Gebietseigenschaften des Untersuchungsgebietes dürften für viele Regionen im deutschen Mittelgebirgsraum zutreffen.

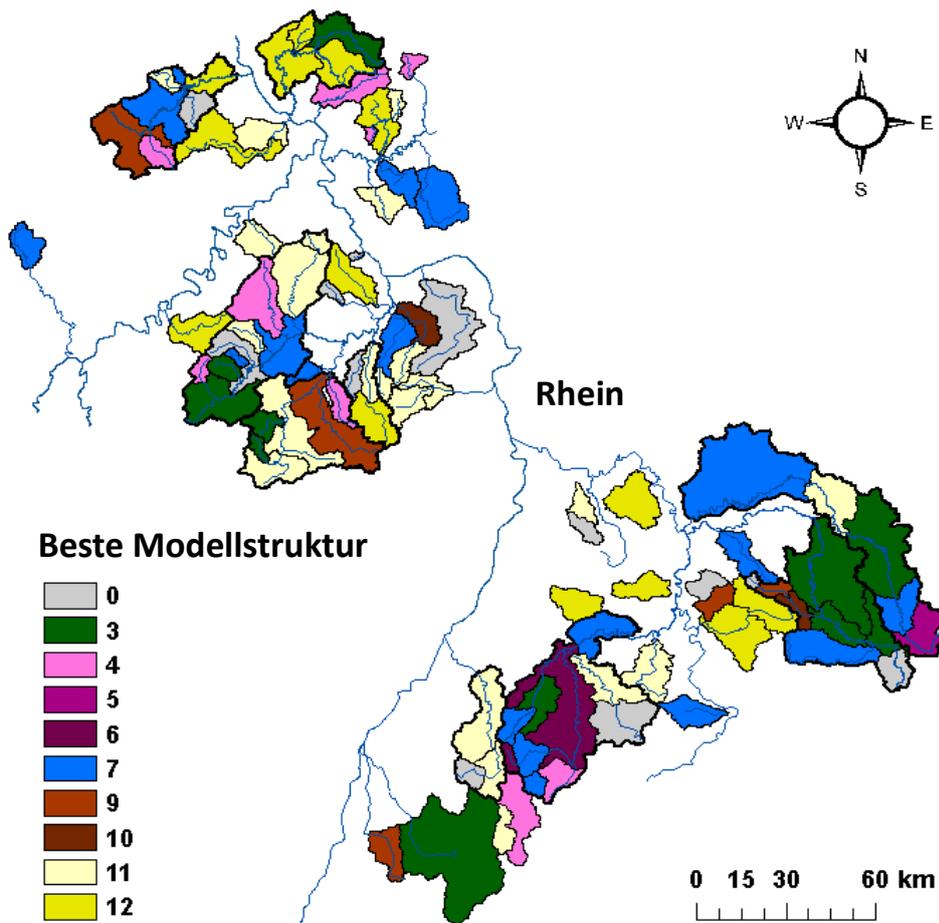


Abb. 7: Räumliche Verteilung der besten Modellstrukturen je EZG. EZG ohne akzeptables Modell sind hellgrau (0) dargestellt. Von geschachtelten Einzugsgebieten sind nur die Oberlieger-Gebiete in voller Größe sichtbar. Große EZG mit mehreren Oberliegerpegeln sind stark schwarz umrandet.

In der Gruppe der EZG ohne akzeptable Modelle sind häufig kleine EZG mit extremen Werten für einzelne Eigenschaften vertreten.

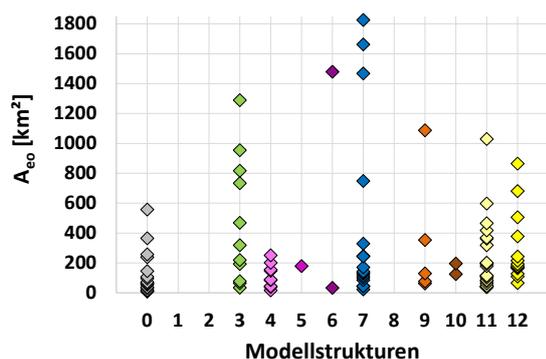
### 5. Diskussion und Ausblick

Die differenzierten Ergebnisse nach EZG und Modellstrukturen zeigen, dass die Modellstrukturen auf EZG mit unterschiedlichen Gebietscharakteristiken „reagieren“. Die durchweg gute Modellgüte verweist auf geeignete Modellstrukturen für die meisten der untersuchten EZG, die jedoch im Einzelnen sicher verbessert werden können.

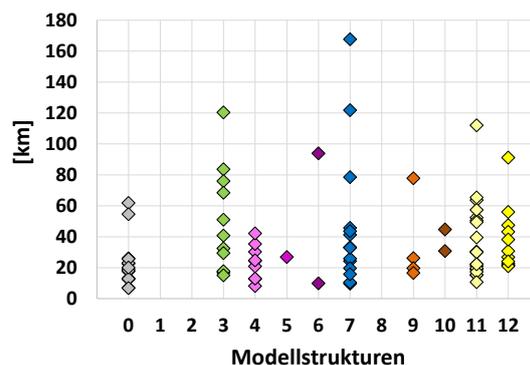
Alle Modelle, die für einzelne EZG eine beste Effizienz zeigen, haben einen ungesättigten und einen schnellen Speicher, Modelle ohne beste Effizienz (M01, M02 und M08) haben eine andere Funktion der Speicher. Damit können alle EZG im Untersuchungsgebiet mit diesen Speichern beschrieben werden. Unterschieden zwischen den EZG werden mit weiteren Modellkomponenten dargestellt.

Für 16 EZG sind die genutzten Modellstrukturen jedoch nicht geeignet. Die Ursachen hierfür sind für jedes EZG individuell und vielfältig: Häufig sind diese EZG klein mit besonderen Gebietseigenschaften, z.B. sehr steile EZG oder sehr einheitliche Landnutzung. Für diese außergewöhnlichen EZG müssen spezielle Modellstrukturen entwickelt werden, die diese Besonderheiten berücksichtigen. Gerade für die kleinen EZG können auch Ungenauigkeiten in den Daten problematisch sein, besonders bezüglich der Gebietsniederschläge.

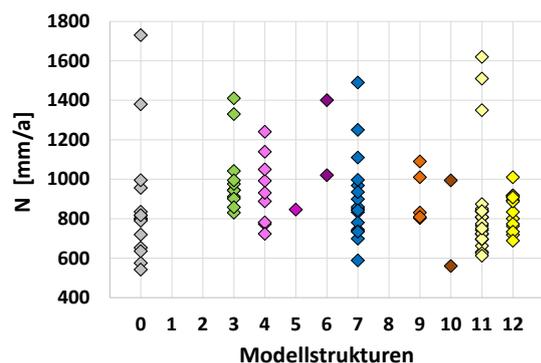
a) Einzugsgebiets-Fläche



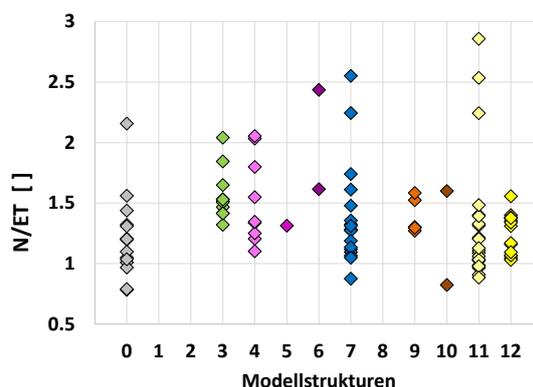
b) maximale Fließlänge



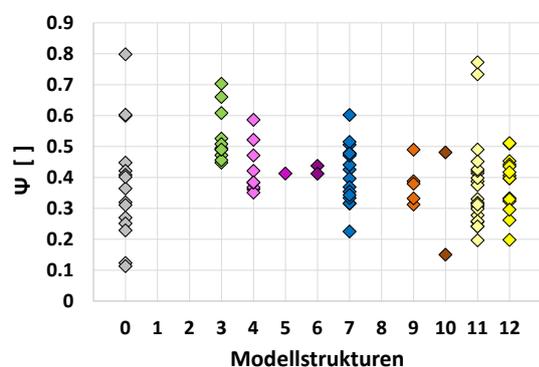
c) langjähriger mittlerer Niederschlag



d) Feuchte-Index



e) Abflussbeiwert



f) Landnutzung Flächenanteil Wald

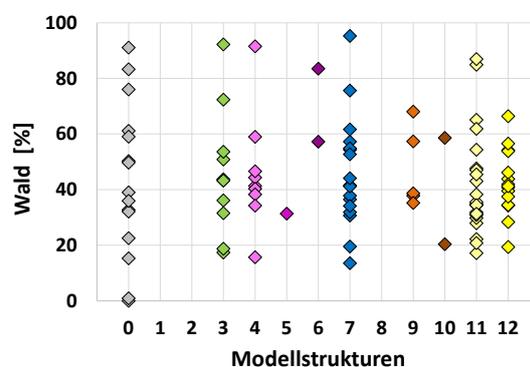


Abb. 8: Auswahl von Gebietscharakteristiken der EZG nach ihren besten geeigneten Modellstrukturen.

Nur wenige Modellstrukturen lassen eine Tendenz zu bestimmten Gebietscharakteristiken erkennen. Für eine Beschreibung der EZG bzw. die Vorauswahl von Modellstrukturen auf Grundlage von Gebietscharakteristiken ist dies jedoch nicht ausreichend.

Die Hauptfrage dieser Studie, ob sich mesoskalige EZG durch konzeptionelle Modellstrukturen charakterisieren lassen, muss bezüglich der untersuchten EZG und Modellstrukturen verneint werden. Die Charakterisierung von Einzugsgebieten ist nur in Einzelfällen und nicht vollständig möglich. Ob und in welchem Maße veränderte oder zusätzliche Modellstrukturen oder Gebietseigenschaften diese Aussage relativieren können, kann nicht abschließend beurteilt werden.

Die Identifikation wichtiger Abflussprozesse und die Klassifikation von Einzugsgebieten ist über die besten Modellstrukturen möglich, jedoch beeinträchtigen die fehlenden Verbindungen zu mittleren Gebietseigenschaften die Interpretation und Nutzung, z.B. für die Regionalisierung von Modellstrukturen, erheblich. Eine Übertragung von Modellen zu unbeobachteten EZG ist weder auf Grundlage von Gebietseigenschaften zwischen Geber- und Nehmer-EZG, noch basierend auf räumlicher Nähe bzw. der Lage im gleichen Naturraum möglich.

Für die Auswahl geeigneter Modellstrukturen für bestimmte EZG geben die Ergebnisse dieser Studie nur sehr begrenzte Anhaltspunkte. Die Auswahl geeigneter Modellstrukturen muss über individuelle Auswahlprozesse, d.h. Test und ggf. Entwicklung einer Vielzahl von Modellstrukturen, erfolgen.

Für den Test und die Entwicklung von Modellstrukturen sind flexible Modellstrukturen innerhalb eines Modellrahmens, wie der hier genutzte SUPERFLEX Modellrahmen, geeignet. Die Signature Indizes erleichtern die Modellevaluation, da sie den gesamten Abflussbereich umfassen und gleichzeitig die Bereiche aufzeigen, in denen Abweichungen zwischen Modell- und Messergebnissen entstehen. Sie ermöglichen damit eine zielgerichtete Modellentwicklung.

Die Auswahl geeigneter konzeptioneller Modellstrukturen entscheidet über die Güte der Modellierung des Abflussverhaltens. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass ein ‚one-fits-all‘-Ansatz für konzeptionelle Modelle weder für die Modellierung des Abflussverhaltens unterschiedlicher EZG noch für weiterreichende Anwendungen wie die Regionalisierung von Modellansätzen ausreicht.

Die Studie wurde im Rahmen des DFG-Projektes „Catchment classification and regionalization with Self-Organizing Maps (SIOMs) and flexible model structures“ (CA728/5-1) erstellt.

### **Literatur**

- BLÖSCHL, G., SIVAPALAN, M., WAGENER, T., VIGLIONE, A. & EDS, H.S., (2013): Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales, Cambridge University Press.
- BUYTAERT, W. & BEVEN, K., (2011): Models as multiple working hypotheses: hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes*, **25**, 1784–1799.

- CLARK, M.P., MCMILLAN, H.K., COLLINS, D.B.G., KAVETSKI, D. & WOODS, R.A., (2011): Hydrological field data from a modeller's perspective: Part 2: process-based evaluation of model hypotheses. *Hydrological Processes*, **25**, 523–543.
- ESSE, W.R. VAN, PERRIN, C., BOOIJ, M.J., AUGUTSIJEN, D.C.M., FENICIA, F. & LOBLIGEOIS, F., (2013): The influence of conceptual model structure on model performance: a comparative study for 237 French catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**, 4227–4239.
- FENICIA, F., KAVETSKI, D. & SAVENIJE, H.H.G., (2011): Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development. *Water Resources Research*, **47**, .
- FENICIA, F., KAVETSKI, D., SAVENIJE, H.H.G., CLARK, M.P., SCHOUPS, G., PFISTER, L. & FREER, J., (2014): Catchment properties, function, and conceptual model representation: is there a correspondence? *Hydrological Processes*, **28**, 2451–2467.
- KAVETSKI, D., KUCZERA, G. & FRANKS, S.W., (2006): Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 2. Application. *Water Resources Research*, **42**, .
- NASH, J.E. & SUTCLIFFE, J.V., (1970): River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**, 282 – 290.
- SAVENIJE, H.H.G., (2009): HESS opinions 'The art of hydrology'. *Hydrology and Earth System Sciences*, **13**, 157–161.
- WAGENER, T. & MCINTYRE, N., (2012): Hydrological Catchment Classification using a Data-Based Mechanistic Strategy. In *System Identification, Environmental Modelling, and Control System Design*. Springer London.



## Parameter transfer as a test for hydrological model regionalization strategies

Hugo Hellebrand, Rita Ley, Markus C. Casper

### Abstract

A successful spatial transfer of a calibrated model should be possible if the hydrological characteristics of two catchments are similar. To test this we transfer calibrated models to multiple gauged basins and identify similarities in their performances. Results are thus independent of a priori selected hydrological and physiographic basin characteristics. A successful model transfer occurs pairwise only for 16 catchments. Although the pairs of successfully transferred models show mainly a spatial proximity, the low overall success rate of the model transfer indicates uncertainties in regionalization approaches.

### 1. Introduction

The understanding of basin behaviour plays a leading role in hydrological research. Key to this understanding is an accurate representation of hydrological processes through models. The spatial transfer of a calibrated model, commonly referred to as regionalization, is based on the assumption that if hydrological characteristics of two catchments are alike, their hydrological responses will be identical too (BLÖSCHL, 2005). Thus, the spatial transfer of a well-calibrated hydrological model to a hydrologically similar basin should produce a similar performance, thereby accurately representing the basin specific processes.

Many regionalization approaches are based on the connection of hydrological and physiographic basin characteristics. However, the selection of these characteristics is a non-trivial exercise, since the link between a characteristic and its runoff generating role is often uncertain (e.g. McDONNELL, 2007) and thus the results of regionalization cannot be proven.

Aim of this study is to test this type of regionalization approach and hence to find hydrologically similar catchments. We transfer models to multiple gauged basins, which we pretend as ungauged. This allows the identification of hydrologically similar basins through a successful model transfer based on a similar model performance. A major advantage of this approach is that the results are independent of a priori selected hydrological and physiographic basin characteristics.

### 2. Study area

The study area consists of 100 small to medium sized gauges catchments (10 km<sup>2</sup> to 1826 km<sup>2</sup>) in the low mountain ranges of south-west Germany (Figure 1). Geology varies from schist, greywacke and quartzite to sedimentary rock with tertiary and quaternary volcanism in the north of the study area to sandstone, marl and limestone in the south of the study area.

All catchments within the study area belong to the same climatic region, but precipitation ranges from 542 mm/y in the Rhine valley up to 1730 mm/y in the Black Forest. All catchments are humid with an aridity index (P/E) of 0.8 in the Rhine valley to about 2.5 in the Black Forest.

Elevation ranges from about 85 to 1000 m a.s.l. whereas most of the area is situated between 300 and 500 m a.s.l.. Most catchments are rural with little urbanization less than 10%. The proportion of forested area varies between 0% and 95%.

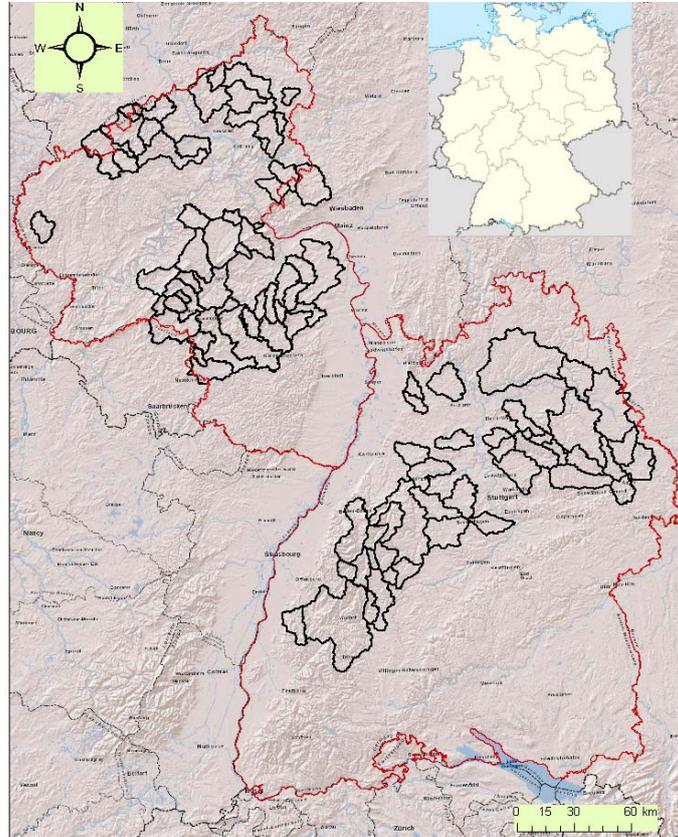


Fig. 1: catchments of the study area. Nested basins are sorted by size: smaller catchments are plotted on top of larger ones so that only headwater basins are displayed completely.

For the model application, hourly runoff, areal precipitation and temperature data for the period from January 1996 to December 2003 are used. These time series cover a wide range of diverse annual or seasonal precipitation and runoff events.

### 3. Methodology

“Hydrological model” and “model structure” can be misleading terms. This study considers a hydrological model as a combination of a specific model structure with a particular parameter set. The calibration of the parameter set with a given objective function and a given calibration technique should display the best performing model for the forcing data. If the forcing data is replaced with the forcing data from another basin, the model itself (i.e. structure and calibrated parameter set) does not change. The replacement of the forcing data is regarded as model transfer (model structure and calibrated parameters) from one basin (donor basin, for which the model is calibrated) to another basin (receiver basin).

To consider hydrological variability between catchments, we use twelve model structures (M1 – M12) of the SUPERFLEX framework, proposed by FENICIA et al. (2013). They include serial, linear and parallel model structures with different numbers of reservoirs and parame-

ters and cover a broad range of conceptual model complexities. The SUPERFLEX framework is an appropriate tool to test the consistency of conceptual hydrological models by means of parameter transfer with a view to regionalization.

One hundred basins with concurrent rainfall and runoff data supply the forcing data. The simple split-sample test (KLEMEŠ, 1986) splits the hourly data into a calibration period and a validation period of equal length. The calibration follows the weighted least squares (WLS) approach, assuming independent Gaussian error with zero mean and standard deviation linearly proportional to the modeled discharge (KAVETSKI and FENICIA, 2011). The calibration procedure applies a quasi-Newton optimization with 30 multi-starts randomly selected across the parameter space.

Model performance is assessed through the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) and four so-called Signature Indices (SI) derived from the Flow Duration Curve (FDC). The NSE gives an overall assessment of the model performance, whereas the SIs provide a measure of performance for meaningful parts of the hydrograph, albeit with no timing component. Signature Indices provide a more diagnostic approach for performance assessment when compared to NSE (LEY et al., 2015).

To test the above-mentioned aim we apply the following six steps:

- 1: Calibrate 12 model structures for 100 catchments.
- 2: Transfer the forcing data of all catchments to all remaining models.
- 3: Calculate Signature Indices and NSE for all simulations.
- 4: Reject simulations if a performance of  $NSE > 0.65$  and Sum of SI  $< 70$  is not achieved.
- 5: Identify similar Signature Indices for calibrated and transferred models by clustering with Self Organizing Maps.
- 6: Check if the reverse of step 5 works as well.

Similar indices indicate a successful model transfer between catchments. If step 6 is positive we regard this pair of catchments as hydrologically similar.

#### 4. Results and discussion

The calibrated models show only minor differences with reference to their performance when compared to the validation period. Therefore, we use the parameter values of calibrated models in our analysis.

A successful model transfer occurs pairwise only for 16 catchments (Figure 3). The pairs show mostly a strong spatial proximity: Either they are really neighbored catchments or are situated in a confined region (Figure 3). Two pairs of catchments with a successful transfer show no spatial proximity. The model transfer of the remaining 84 catchments does not lead to a successful transfer, although they are often neighbored or nested. Moreover, the majority of the catchments that have comparable hydrological or physiographic characteristics show no successful model transfer.

Four model structures allow this transfer, where model structure complexity does not lead necessarily to better results. For model structure M3 (two reservoirs and three parameters)

four catchments show a successful transfer, whereas for model structure M12 (four reservoirs and eight parameters) five catchments show a successful transfer.

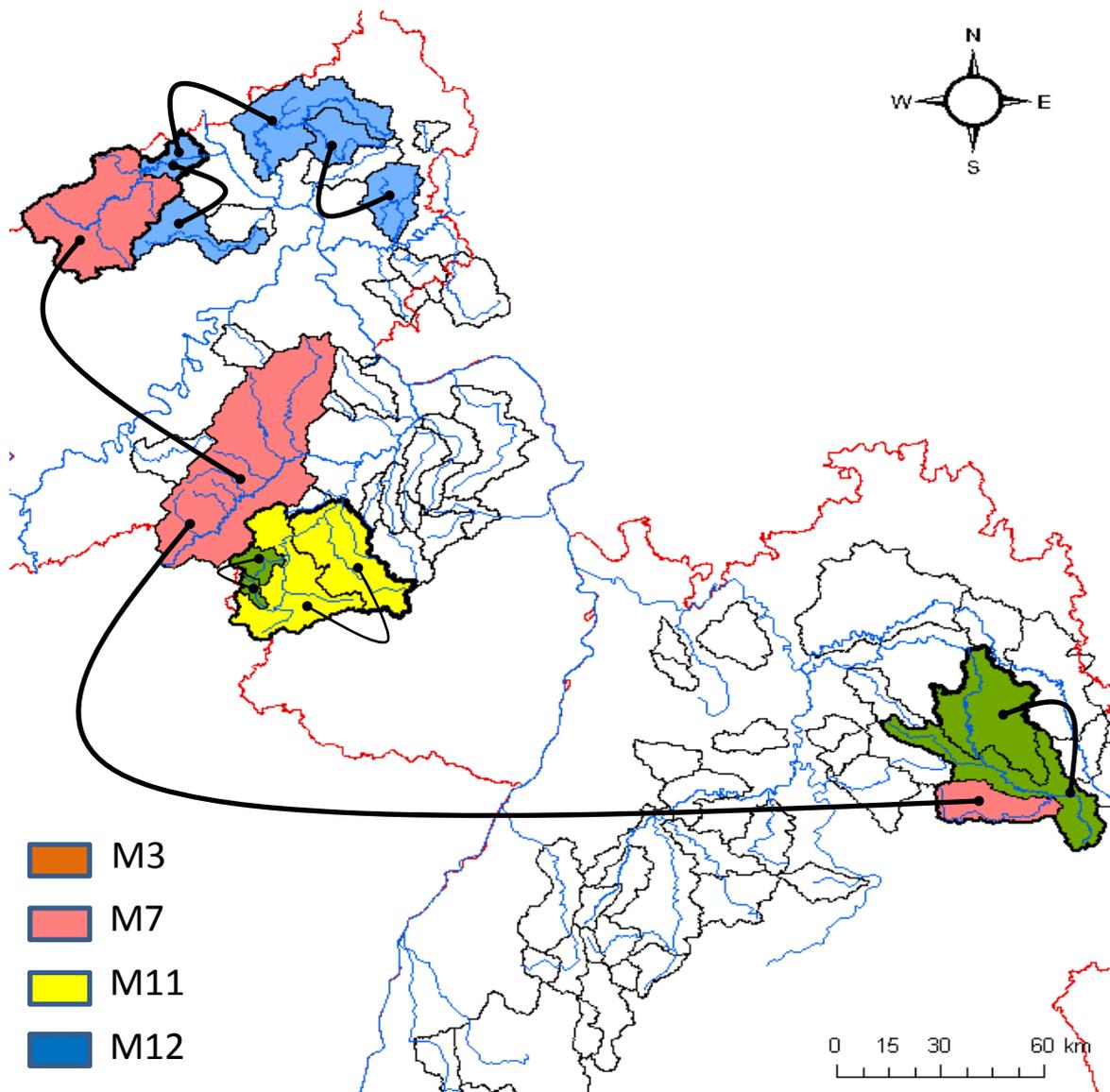


Figure 3. Results of the clustering with SOM. The curves connect basins with similar behavior after model transfer.

## 5. Conclusions

Although the superflex framework supplies us with a tool to test multiple models that are hypothetically connected to hydrological processes, the low success rate of the model transfer indicates uncertainties in regionalization approaches. The identification of hydrologically similar catchments is not possible with this model transfer approach.

## Acknowledgements

We acknowledge the financial support of the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) through grant CA728/5-1.

## References

- BLÖSCHL, G. (2005): Rainfall-Runoff Modeling of Ungauged Catchments, Encyclopedia of Hydrological Sciences, edited by Anderson, M. G., John Wiley Sons, Ltd.
- FENICIA, F., KAVETSKI, D., SAVERNIJE, H., CLARK, M., SCHOUPS, G., PFISTER, L. & FREER, J. (2013): Catchment properties, function, and conceptual model representation: is there a correspondence? *Hydrological Processes*, 28: 2451–2467. doi:10.1002/hyp.9726.
- KAVETSKI, D. & FENICIA, F. (2011): Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 2. Application and experimental insights. *Water Resour. Res.* 47, doi:10.1029/2011WR010748.
- KLEMES, V. (1986): Operational Testing of Hydrological Simulation-Models. *Hydrological Sciences Journal*, 13: 13–24.
- LEY, R., HELLEBRAND, H., FENICIA, F. & CASPER, M. (2015): Comparing classical performance measures with signature indices derived from flow duration curves to assess model structures as tools for catchment classification. *Hydrology Research*, 13: 13–24.
- McDONNELL, J., SIVAPALAN, M., VACHE, K., DUNN, S., GRANT, G. & HAGGERTY, R. (2007): Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology. *Water Resources Research* 43 (7).



## **Vergleich von drei zur Flussgebietsanalyse abgeleiteten synthetischen Hochwassern mit den Originalereignissen unter dem Aspekt Scheitelhöhe und Heterogenität der Ganglinien**

Natalie Stahl

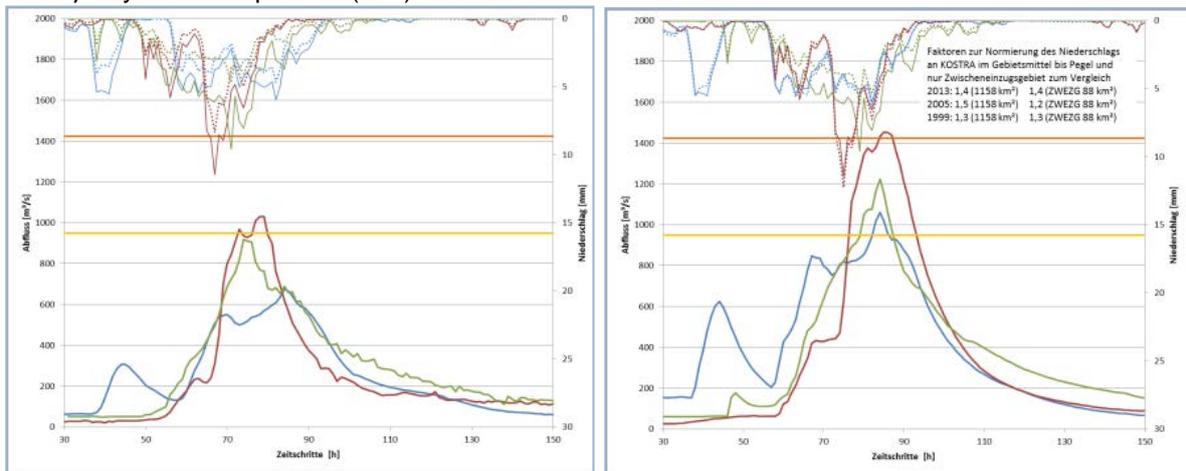
### **Zusammenfassung**

Um mit einem Niederschlags-Abfluss-Modell (N-A-Modell) Flussgebietsanalysen für Hochwasserschutzplanungen in größeren Einzugsgebieten durchzuführen, wird ein Szenario-Ereignis benötigt. Verwendet man real abgelaufene Ereignisse greift man auf beobachtete Werte zurück, die jedoch auf Grund der heterogenen Verteilung der Niederschläge und der abflussbildenden Prozesse zwischen den beobachteten Ereignissen stark schwanken können und daher einen zufälligen Zustand beschreiben. Statistische Verfahren leiten einen wahrscheinlichen Datensatz ab, der die charakteristischen Eigenschaften beschreibt, aber in dieser Form noch nicht beobachtet wurde. Ziel der praktischen Untersuchung ist es, den Erkenntnisgewinn aus beiden Ansätzen zu nutzen und die Verfahren zu kombinieren, um über das Einzugsgebiet räumlich homogenere Datensätze zu erhalten sowie Ereignisse, die größer sind als die bisher beobachteten.

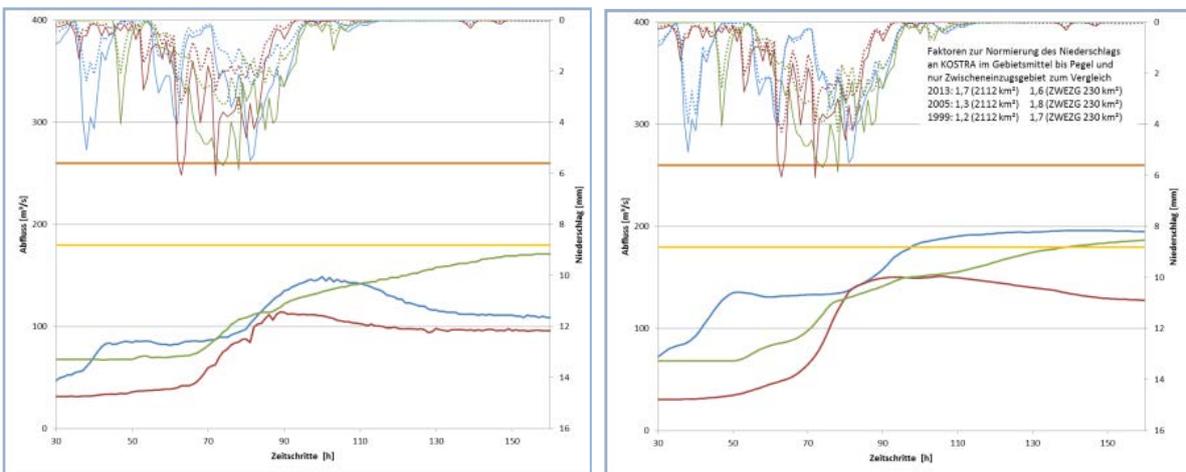
### **1. Einleitung**

Für die Planung des Hochwasserschutzes an der Isar soll ein Maßnahmenkonzept für das gesamte Einzugsgebiet erstellt werden. Eine Wirkungsanalyse soll aus verschiedenen Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen, die mit der effektivsten Erhöhung des Schutzgrades des Gesamtsystems herausarbeiten. Es steht nicht der Schutz einzelner Siedlungen im Vordergrund, deshalb soll die Wirkung der Maßnahmen auch für Ereignisse untersucht werden, die größer als das HQ100 sind. Dafür ist der Wellenablauf im Gebiet mit der charakteristischen zeitlichen und quantitativen Abhängigkeit der Scheitel der verschiedenen Teilsysteme möglichst gut zu beschreiben. Gerade diese Abhängigkeiten sind durch statistische Verfahren in komplexen Einzugsgebieten schwierig abzubilden. Die Analyse von abgelaufenen Hochwasserereignissen bietet hingegen eine gute Basis, um charakteristische Wellenabläufe unter Berücksichtigung der Genese der Hochwasserereignisse nachzubilden. Um die Vorteile beider Methoden für die Flussgebietsanalyse der Isar zur Hochwasserschutzplanung zu nutzen, wurde ein Szenario-Ereignis abgeleitet, das möglichst repräsentativ die Gesamtzusammenhänge beschreibt. Dazu werden die Gebietsniederschläge von Hochwasserereignissen auf die KOSTRA N100 (MALITZ 2005) Niederschläge normiert und mit einem N-A-Modell (LARSIM) (BREMICKER 2000) synthetische Ganglinien erzeugt. Für die Simulation wurde mit einem festen Abflussbeiwert für eine lineare Beziehung zwischen Gebietsniederschlag und Effektivniederschlag gearbeitet. Die Ergebnisse werden an den Beispielen der Hochwasser 1999, 2005 und 2013 am Isareinzugsgebiet gezeigt. Die folgende Analyse zeigt, inwieweit die Methode ein Potential hat, die Ergebnisse der Flussgebietsanalyse zu objektivieren.

a) Sylvensteinspeicher (Isar)



b) Ampermoching (Amper)



c) Beuerberg (Loisach)

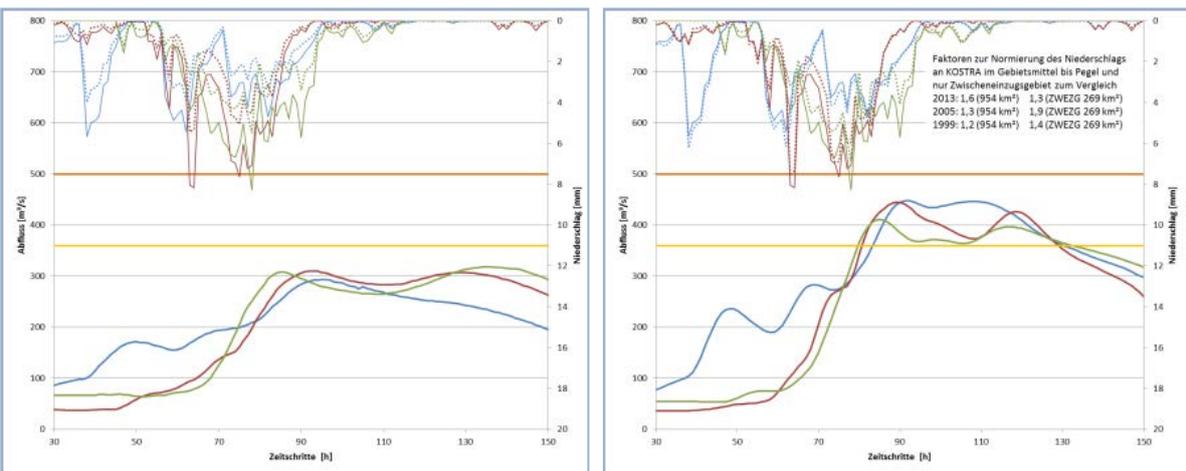


Abb. 1: Vergleich gemessener und synthetischer Hochwasserganglinien mit Gebiets- und Effektivniederschlagsverlauf

## 2. Ganglinienanalyse

Für die Ganglinienanalyse wurden 3 gut belegte Pegel aus dem Isareinzugsgebiet gewählt. Es werden die Originalganglinien (Abb. 1 links) verglichen mit den theoretischen Ganglinien (Abb. 1 rechts), die an den Pegeln durch Normierung mit dem N100 abgeleitet werden. Im Gebietsmittel für das Gesamteinzugsgebiet lagen die Niederschläge der Originalereignisse nur bei 60 bis 70 % der N100 Niederschlagssumme. Die mit dem N100 abgeleiteten Ganglinien liegen daher alle höher als die beobachteten. Der N100 erzeugt mit den Abflussbeiwerten der Originalganglinien ein Ereignis seltener als HQ100 mit Ausnahme von Ampermoching.

Am **Sylvensteinspeicher** wird vor allem die kleinere Welle von 2013 deutlich erhöht. Die mit normiertem Niederschlag simulierte Welle von 2005 hat trotz gleicher Niederschlagssumme einen höheren Scheitel als die anderen, da die Niederschlagsverteilung höhere Stundensummen (vgl. Effektivniederschlag) generiert. Bei **Amper und Loisach** zeigt sich der Effekt der Normierung ebenfalls vor allem 2013 im hinteren Teil der Welle, der alpin geprägt ist. Die Ganglinien von **Ampermoching** zeigen darüber hinaus, dass für die Amper neben dem Ereignisniederschlag auch der Startabfluss vor dem Ereignis ausschlaggebend ist dafür, welcher Scheitel erreicht wird. Die „Vor“-Fülle des Ammersees prägt durch sein großes Volumen den Startabfluss der Amper signifikant.



Abb. 2 Das Isareinzugsgebiet mit den Pegelstandorten von Abbildung 1 und Tabelle 1

## 2 Heterogenität der Niederschläge und Abflüsse im Einzugsgebiet vor und nach der Normierung:

In Tabelle 1 sind 13 Pegel (Pegelstandorte siehe Abb. 2) mit Scheiteln aufgelistet, um die räumlichen Unterschiede in der Abflusshöhe zu zeigen. Zur Einordnung der Scheitelhöhe ist das statistische HQ100 und HQ1000 am Pegel aufgeführt, sowie die Abweichung der Niederschlagssumme vom N100 als Faktor. Die Tabelle zeigt vor allem am Ereignis von 2013, dass an allen Pegeln in Kombination mit den KOSTRA Daten eine deutliche Erhöhung der Abflüsse erfolgt, an 12 von 13 Pegeln auf größer als HQ100.

Die Tabelle zeigt die Abweichungen zum N100 als Faktoren jeweils bezogen auf das gesamte Pegelinzugsgebiet. Die größten Abweichungen traten 2013 auf. 1999 sind die räumlichen Unterschiede am geringsten, was auch an der damals geringeren Messnetzichte des beobachteten Niederschlages liegen kann. In der Abbildung 1 sind zum Vergleich auch die Faktoren für das Zwischeneinzugsgebiet zwischen den Pegeln aufgeführt, um die räumliche Heterogenität deutlicher zu zeigen. Gerade die nördlichen Gebiete haben bei allen drei Ereignissen die größten Abweichungen in den einzelnen Zwischeneinzugsgebieten zum N100, was durch die Mittelung auf die Pegelkontrollbereiche in der Tabelle nicht ablesbar ist, aber in der Abbildung 1 der Ganglinien bei Ampermoching.

Tabelle 1: Scheitel ohne und mit Normierungsfaktor im Vergleich zum HQ100 und HQ1000

Pegelname	Gewässer	EZG [km <sup>2</sup> ]	Scheitel* [m <sup>3</sup> /s] (Abweichung N100)			Scheitel [m <sup>3</sup> /s]			HQ100 (m <sup>3</sup> /s)	HQ1000 (m <sup>3</sup> /s)	
			2013 n	2005 n	1999 n	2013	2005	1999			
Mittenwald	Isar	404	257 (1,9)	322 (1,5)	195 (1,2)	118	186,7	160	180	320	
Sylvensteinsee	Isar	1153	1060 (1,4)	1454 (1,5)	1225 (1,3)	687	1030	920	950	1425	
München	Isar	2836	1883 (1,4)	2450 (1,4)	2003 (1,3)	1280	1756	1511	1500	2100	
Plattling	Isar	8435	2314 (1,6)	2116 (1,6)	1880 (1,4)	1514	1442	1400	1550	2100	
Peternerbrücke	Jachen	136	153 (1,6)	171 (1,1)	189 (1,2)	103	135	129	110	170	
Beuerberg	Loisach	952	481 (1,6)	475 (1,3)	436 (1,2)	328	341	340	325	465	
Partenkirchen	Partnach	95	77 (1,7)	78 (1,2)	79 (1,3)	38	63	55	73	110	
Stegen	Amper	993	149 (1,6)	95 (1,2)	156 (1,1)	82,8	77	148	130	200	
Ampermoching	Amper	2189	196 (1,7)	151 (1,3)	189 (1,2)	149	114	170	180	260	
Oberammergau	Ammer	114	165 (1,7)	193 (1,1)	210 (1,2)	88	181	168	150	230	
Weilheim	Ammer	607	539 (1,6)	541 (1,1)	714 (1,2)	363	461	563	480	750	
Raisting	Rott	55	57 (1,9)	34 (1,3)	59 (1,1)	35	28	56	65	95	
Windachspeicher	Windach	60	70 (2,5)	40 (1,6)	48 (1,1)	28	24	41	49	70	
Anzahl Pegel mit Q > HQ100			12	9	11	0	5	5			
			* Scheitel durch Normierung der Zwischeneinzugsgebiete auf KOSTRA N100								
			Die grauen Zahlen sind simulierte, die schwarzen gewässerkundliche Werte								

## 3. Bewertung der Ergebnisse

Es werden mit dieser Methode seltene Hochwasser erzeugt, die auf der Kombination der beobachteten Abflussreaktionen des Gebietes und dem tatsächlichen Verlauf der Niederschlagsintensitäten mit der statistischen Niederschlagssumme beruhen. Die räumliche Homogenisierung der Niederschlagssumme auf das N100 nähert vor allem dann die Scheitelhöhen der Ereignisse an, wenn in den Originalereignissen statistisch sehr unterschiedliche Niederschlagssummen im (Pegel-)Einzugsgebiet auftreten. Das Verfahren ist auch dann hilfreich, wenn ein Szenario benötigt wird, das deutlich höher ist als bereits beobachtete Ereignisse. Das Verfahren ist in der Praxis einfach umzusetzen und verringert die Zufälligkeit der Scheitel. Die Normierung der Niederschlagssumme auf das N100 erfolgt

im Isareinzugsgebiet flächendifferenzierter als eine Normierung der Abflussscheitel auf die Pegelstatistik, da die N100 Werte flächendeckend vorliegen, die HQ100 Werte nicht. Auch gibt es etwa doppelt so viele Niederschlagsmessungen wie Abflusspegel. Die Normierung der Ereignisniederschlagssumme hat jedoch nicht alle Inhomogenitäten der Originalereignisse ausgleichen können. Für die Wirkungsanalyse wurde daher das Szenario-Ereignis aus dem normierten Hochwasser 1999 verwendet, da es in der räumlichen und zeitlichen Verteilung des Originalereignisses am homogensten ist. 1999 wurden relativ gleichmäßig Scheitel im Bereich des HQ100 erreicht (LfU 2003) und der zeitliche Niederschlagsverlauf hatte zwar hohe Stundenniederschläge, erreichte jedoch nicht die Spitzen wie 2005. Auch nach der Normierung beschreibt dieses Ereignis, wie bereits das Ausgangshochwasser, am besten einen mittleren Zustand. Durch die Normierung kann es als charakteristisches seltenes Ereignis ( $> HQ100$ ) herangezogen werden.

#### **4. Ausblick**

Bei einigen Pegeln und Ereignissen unterscheiden sich die abgeleiteten Scheitel trotz Normierung der Niederschlagssumme immer noch markant in der Scheitelhöhe. Das erklärt sich in den verschiedenen Gebietsreaktionen auf den Niederschlag. Hier spielen vor allem die Vorbedingungen (z. B. Fülle der Seen) und die Abflussbereitschaft eine Rolle, aber auch der Verlauf der Niederschlagsintensitäten, der sich sehr deutlich in der Wellenform wieder spiegelt. Als nächster Schritt können neben der Niederschlagssumme auch die Auswirkungen der Wahl der Abflussbeiwerte, welche die Abflussbereitschaft des Gebiets beschreiben, und des Niederschlagsverlaufes auf die synthetischen Scheitel untersucht werden. Dazu kann in den Vergleich zum einen die Berechnung mit synthetischen Niederschlagsverläufen (DVWK) hinzugenommen werden und zum anderen die Berechnung mit aus mehreren Ereignissen gemittelten Abflussbeiwerten, um die Variabilität für die Pegelkontrollbereiche weiter zu verringern.

#### **Literatur**

- BREMICKER M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br., Freiburg i. Br.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (2003): Hochwasser Mai 1999, Gewässerkundliche Beschreibung, München (online Ausgabe).
- MALITZ, G. (2005): Grundlagenbericht über Starkniederschlagshöhen in Deutschland (Grundlagenbericht KOSTRA-DWD-2000). Deutscher Wetterdienst, Hydrometeorologie.



## Überschätzte Niederschlagsmengen oder überschätzter Versiegelungsgrad? Unsicherheiten bei der NA-Modellierung in urban geprägten Einzugsgebieten

Svetlana Cartus, Horst Werner, Tilo Keller, Christian Gattke

### Zusammenfassung

Bei einer gekoppelten Modellierung von Niederschlag-Abflussprozessen in „gemischten“ natürlichen und urban geprägten Einzugsgebieten mittels eines konzeptionellen hydrologischen Modells spielt die Berücksichtigung der räumlichen Heterogenität eine besondere Rolle. Dies bezieht sich sowohl auf die räumlich-zeitliche Variabilität der Niederschläge als auch die städtischen Strukturen. Am Beispiel des Elsbachs in Grevenbroich wurden die Sensitivitäten des Eichfaktors für den Versiegelungsgrad und der Modelleingangsgröße Niederschlag, sowie deren Wechselwirkungen untersucht. Hierzu wurden im Rahmen einer klassischen Sensitivitätsanalyse die Veränderung der Anpassungsgüte sowie die Simulationsbandbreite verschiedener Niederschlagszenarien ausgewertet und dargestellt. Obwohl das Abflussgeschehen der beobachteten Abflüsse mit dem Modell grundsätzlich gut abgebildet werden kann, geht aus der Untersuchung aufgrund der räumlichen Heterogenität nicht eindeutig hervor, ob die Niederschläge oder die Versiegelungsgrade überschätzt werden.

### 1. Einleitung

Hydrologische Modelle werden mittlerweile standardmäßig in der wasserwirtschaftlichen Planung und Praxis eingesetzt. Sie dienen als Grundlagen für die Erstellung von Wasserbilanzen, der Verlängerung von hydrologischen Zeitreihen, der Vorhersage von hydrologischen Kennwerten und Extremen und der Bemessung und Steuerung von wasserwirtschaftlichen Anlagen (UHLENBROOK, 2005). Trotz der kontinuierlichen Verbesserungen in der Entwicklung und Kalibrierung hydrologischer Modelle sind die Simulationsergebnisse mit Unsicherheiten behaftet. Diese lassen sich im Wesentlichen auf drei Quellen zurückführen: (1) Strukturelle Modellunsicherheiten, die sich aus der vereinfachten Abbildung des hydrologischen Systems ergeben, (2) Parameterunsicherheiten und (3) Datenunsicherheiten (GATTKE & SCHUMANN, 2007).

Bei einer gekoppelten Modellierung von Niederschlag-Abflussprozessen in „gemischten“, das heißt natürlichen und urban geprägten Einzugsgebieten mittels eines konzeptionellen hydrologischen Modells spielt die Berücksichtigung der räumlichen Heterogenität eine besondere Rolle. Dies bezieht sich sowohl auf die räumlich-zeitliche Variabilität der Niederschläge als auch die städtischen Strukturen wie versiegelte Flächen und Abwasserbauwerke. In vielen Fällen besteht kein ausreichend dichtes Netz an Niederschlagsmessstationen, so dass erhebliche Unsicherheiten bezüglich der Niederschlagsintensitäten bestehen. Diesen gegenüber stehen die Unsicherheiten, die sich aus der Aggregation der räumlichen Strukturen im urbanen Raum (Topographie, Kanalnetze, Versiegelungsgrade) in einem konzeptionellen NA-Modell ergeben. In diesem Beitrag werden die Wechselwirkungen zwischen den Eingangsgrößen (Niederschlag) und den Modellparametern (Versiegelungsgrade) am Beispiel des Elsbachs im Stadtgebiet Grevenbroich untersucht und diskutiert. Anlass der durchgeführten Untersuchung waren Fragestellungen zur Hochwassergefährdung und Gewässerverträglichkeit von Niederschlagswassereinleitungen am Elsbach in Grevenbroich, die mithilfe des konzeptionellen NA-Modells NASIM beantwortet werden sollten.

Der Elsbach ist ein kleiner, urban geprägter Zufluss zur unteren Erft (Abbildung 1 links). Die wasserwirtschaftlichen Verhältnisse im Erfteinzugsgebiet sind in weiten Teilen durch die seit

Mitte des 20. Jahrhunderts einsetzende Braunkohleförderung in Großtagebauen stark anthropogen überprägt (GATTKE et al., 2015). So hat der Elsbach durch den Tagebau Garzweiler über die Hälfte seines ursprünglichen Einzugsgebietes verloren, dessen Größe sich dadurch auf 6,4 km<sup>2</sup> reduziert. Darüber hinaus hat der Elsbach aufgrund der weitreichenden Grundwasserabsenkung zur Trockenhaltung des Tagebaus wie die meisten Gewässer in der Region keinen Grundwasseranschluss. Nach Beendigung des Tagebaus sollen etwa 11,7 km<sup>2</sup> als landwirtschaftlich rekultivierte Flächen wieder an das derzeitige Einzugsgebiet angeschlossen werden (Abbildung 1 rechts oben).

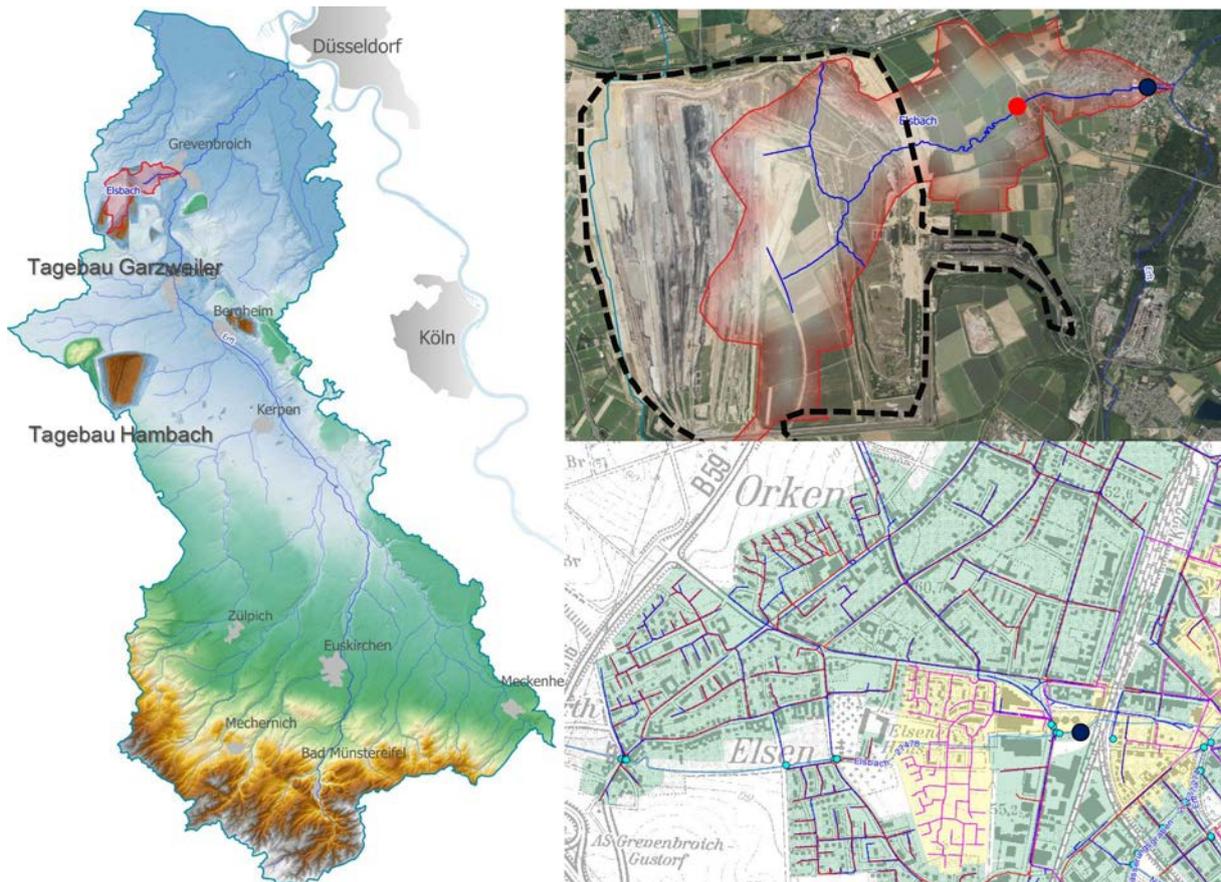


Abb. 1: links: Lage des Elsbachs im Erfteinzugsgebiet, rechts oben: zukünftiges Elsbacheinzugsgebiet nach Rekultivierung (Stand Luftbild: 2013), Das aktuelle Elsbacheinzugsgebiet reicht bis zur gestrichelt umrandeten Betriebsfläche des Tagebaus, roter Punkt: Einleitung Wasserwerk Fürth, blauer Punkt: Standort Abflussmessung, rechts unten: Kanalisierte Siedlungsflächen am Elsbach mit Einleitstellen, gelbe Flächen: Mischsystem, grüne Flächen: Trennsystem, blauer Punkt: Standort Abflussmessung

Etwa 17 % des aktuellen Einzugsgebietes sind Siedlungsflächen, die vorwiegend im Trennsystem über Direkteinleitungen in den Elsbach entwässern. Ein kleinerer Flächenanteil entwässert im Mischsystem in die Kanalisation (Abbildung 1 rechts unten). Das nachgeschaltete Regenüberlaufbecken wiederum entlastet ebenfalls in den Elsbach.

Aufgrund des verhältnismäßig kleinen natürlichen Einzugsgebiets in Verbindung mit dem fehlenden Grundwasseranschluss ist der Elsbach im Oberlauf ephemere. Erst ab der Einlei-

tung der Sumpfung- und Spülwasser am Wasserwerk Fürth besteht eine permanente Wasserführung (Abbildung 1 rechts oben). Bei stärkeren Regenereignissen bestimmen vor allem die Siedlungswassereinleitungen der abflusswirksam versiegelten Flächen das Abflussgeschehen im Unterlauf des Elsbachs.

## 2. Modellierung

Ziel der Untersuchung war die Plausibilisierung des hydrologischen Modells des Elsbachs hinsichtlich der Abbildungsgenauigkeit der Stadtentwässerung mit Hilfe der Daten aus einer zweimonatigen Abflussmesskampagne. Aufgrund der besonderen Einzugsgebietsstruktur spielt die detaillierte Betrachtung der Stadtentwässerung, insbesondere der Kanalnetzstruktur und der Versiegelungsgrade für die Einschätzung der Hochwassersituation in der Ortslage einerseits und die Beurteilung der immissionsorientierten Gewässerverträglichkeit der Niederschlagswassereinleitungen andererseits eine zentrale Rolle. Untersucht wurden die Sensitivitäten des Eichfaktors für den Versiegelungsgrad und der Modelleingangsgröße Niederschlag, sowie deren Wechselwirkungen. Obwohl hydrologische Modelle seit Jahrzehnten in der Stadtentwässerung eingesetzt werden, existieren scheinbar nur wenige Untersuchungen zur Genauigkeit der Simulationsergebnisse in diesem Anwendungsbereich (SCHAARDT, 2012).

Für die Modellierung wurde das konzeptionelle, hydrologische Modell NASIM verwendet. NASIM zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass urbane Abflüsse unter Berücksichtigung sämtlicher hydraulisch wirkenden Elemente eines Kanalnetzes kontinuierlich und mit hoher zeitlicher Auflösung simuliert werden können (HYDROTEC, 2015). Auf diese Weise konnte parallel zum natürlichen Abflussgeschehen des Einzugsgebietes die gesamte Kanalnetzstruktur mit allen wesentlichen Elementen in einem Modell abgebildet werden. Innerhalb von NASIM wird die Abflussbildung auf natürlichen und versiegelten Flächen getrennt betrachtet. Der Abfluss von natürlichen Flächen wird innerhalb eines Bodenspeichermodells in die Komponenten Oberflächen-, Zwischen- und Grundwasserabfluss aufgeteilt. Die Verknüpfung von natürlichem Einzugsgebiet zum Kanalsystem erfolgt über die versiegelten Abflussanteile und Trockenwetterabflüsse, welche jeder Siedlungsfläche zugewiesen werden. Die Anbindung der ermittelten Abflüsse aus dem Kanalnetz an das Gewässer erfolgt über Beckenabschläge aus Regenüberlauf- oder Regenrückhaltebecken. Auch Sonderbauwerke wie Schmutzwasserweichen in Trennsystemflächen, welche Fehlanlüsse im Trockenwetterfall zum Kanalnetz umleiten, lassen sich über Abzweigelemente in NASIM darstellen. Der fehlende Grundwasseranschluss wird im Elsbachmodell über einen unendlich großen/tiefen Grundwasserwasserspeicher, welcher in den Anfangsbedingungen festgelegt wird, realisiert.

### 2.1 Elsbach-Modell

Das Modell des Elsbachs ist ein Teilmodell des Flussgebietsmodells der Erft. Am Elsbach selbst gibt es keinen kontinuierlich messenden Gewässerpegel, so dass die Feineinstellung der Parameter entsprechend der Kalibrierung des Erft-Zwischeneinzugsgebietes zwischen den Pegeln Bedburg-Broich (ca. 1.485 km<sup>2</sup>) und Neubrück (ca. 1.595 km<sup>2</sup>) erfolgte.

Die Schwierigkeit bei der Eichung des Zwischeneinzugsgebietes besteht in der starken anthropogenen Überprägung des Erfteinzugsgebietes. Im Wesentlichen erschweren die enor-

men Sumpfungswassereinleitungen, die das natürliche Abflussverhalten des Einzugsgebietes nur noch schwer erkennen lassen, sowie der durch die bergbaubedingte Grundwasserabsenkung fehlende Grundwasseranschluss der Gewässer und die durch das geringe Gefälle in der Niederrheinischen Bucht bedingte träge Abflussreaktion des Zwischeneinzugsgebietes die Kalibrierung des Modells. Innerhalb dieser Untersuchung wurde die Modellanpassung aus der globalen Kalibrierung für das Teilmodell des Elsbachs anhand der zweimonatigen Abflussmesskampagne validiert.

Das Elsbach-Modell besteht aus insgesamt 23 Teilgebieten von denen allein 17 Teilgebiete städtische Flächen sind, die entweder im natürlichen Einzugsgebiet des Elsbachs liegen oder deren Niederschlagswasser über Kanalnetze gefasst in das Elsbacheinzugsgebiet geführt werden. Die Größe der Siedlungsflächen variiert in Abhängigkeit der Kanalnetzstruktur zwischen 0,2 und 430 Hektar. Jeder Einleitstelle ist mindestens eine Fläche zuzuordnen. Die Versiegelungsgrade der einzelnen Flächen basieren grundsätzlich auf der aktuell gültigen Netzanzeige Kläranlage Grevenbroich des Erftverbandes bzw. dem Niederschlagswasserbeseitigungskonzept der Wirtschaftsbetriebe Grevenbroich (WGV). Diesen wiederum liegen Luftbildaufnahmen oder Eigenveranlagungsdaten zugrunde.

## 2.2 Abflussmesskampagne

Die von den WGV in den Sommermonaten letzten Jahres angesetzte Messkampagne im Elsbach diente als Grundlage für die Plausibilisierung des Elsbachmodells. Gemessen wurden Wasserstand (cm) und Abfluss (l/s) vom 1.7.- 1.9.2014 in MESZ mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten. Die Messstelle befand sich in der letzten Verrohrung des Elsbachs, kurz vor der Einmündung in die Erft, so dass alle Einleitungen aus der Siedlungsentwässerung in dem gemessenen Abfluss erfasst wurden.

Da die Messreihe sehr lückenhaft ist, ist sie nur bedingt zur Plausibilisierung geeignet. Im Messzeitraum liegt lediglich ein lückenloses längeres Abflussereignis, das für die anstehende Untersuchung herangezogen werden kann. Dies ist das Abflussereignis vom 08./09.07.2014, welches in dem Beitrag näher betrachtet und ausgewertet wird.

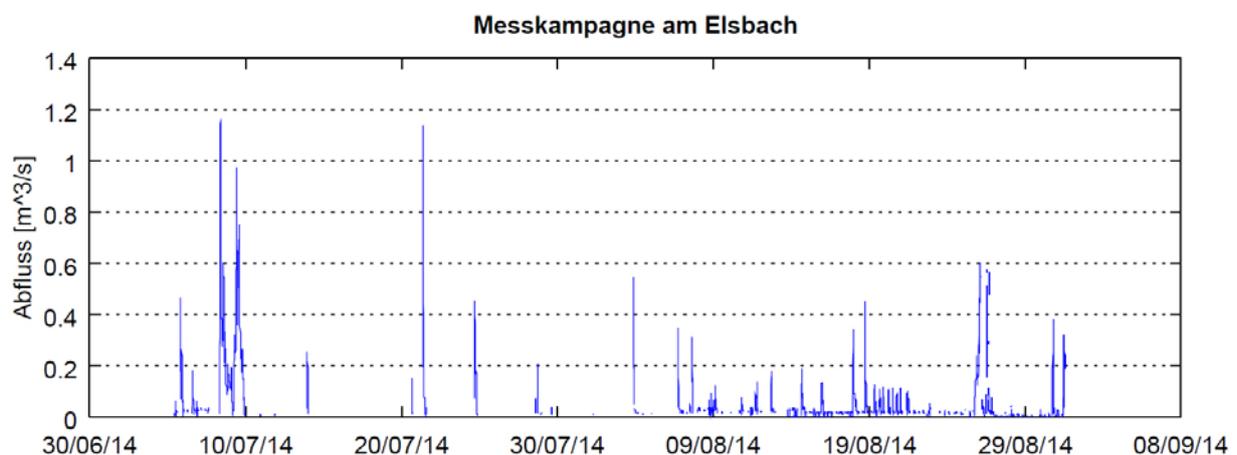


Abb. 2: Beobachteter Abfluss der Messkampagne im Elsbach in den Monaten Juli und August 2014 an der Messstelle

### 2.3 Niederschlagszenarien

Für die Modellierung lagen nur Daten von außerhalb des Elsbacheinzugsgebiets gelegenen Niederschlagsstationen und unangeeichte Radardaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) vor. Die nächsten Niederschlagsstationen des Erftverbandes (EV) liegen etwa 2,4 bis 3,0 km vom Elsbacheinzugsgebiet entfernt. Mit den von den WGV zur Verfügung gestellten Stationsdaten konnte die Datenbasis erweitert werden. Als besonders relevant für die Modellierung erwies sich die WGV-Station "Zum Türling", die in unmittelbarer Nähe des Untersuchungsraumes liegt. In Erwartung eines zusätzlichen Erkenntnisgewinns wurde das Untersuchungsgebiet zudem mit den unangeeichten Radardaten Radolan-RY des Deutschen Wetterdienstes belastet. Diese besitzen eine zeitliche Auflösung von 5 Minuten und eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km. Abbildung 3 zeigt die Lage der Niederschlagsstationen und Radardaten, die für die Untersuchung zur Verfügung standen.

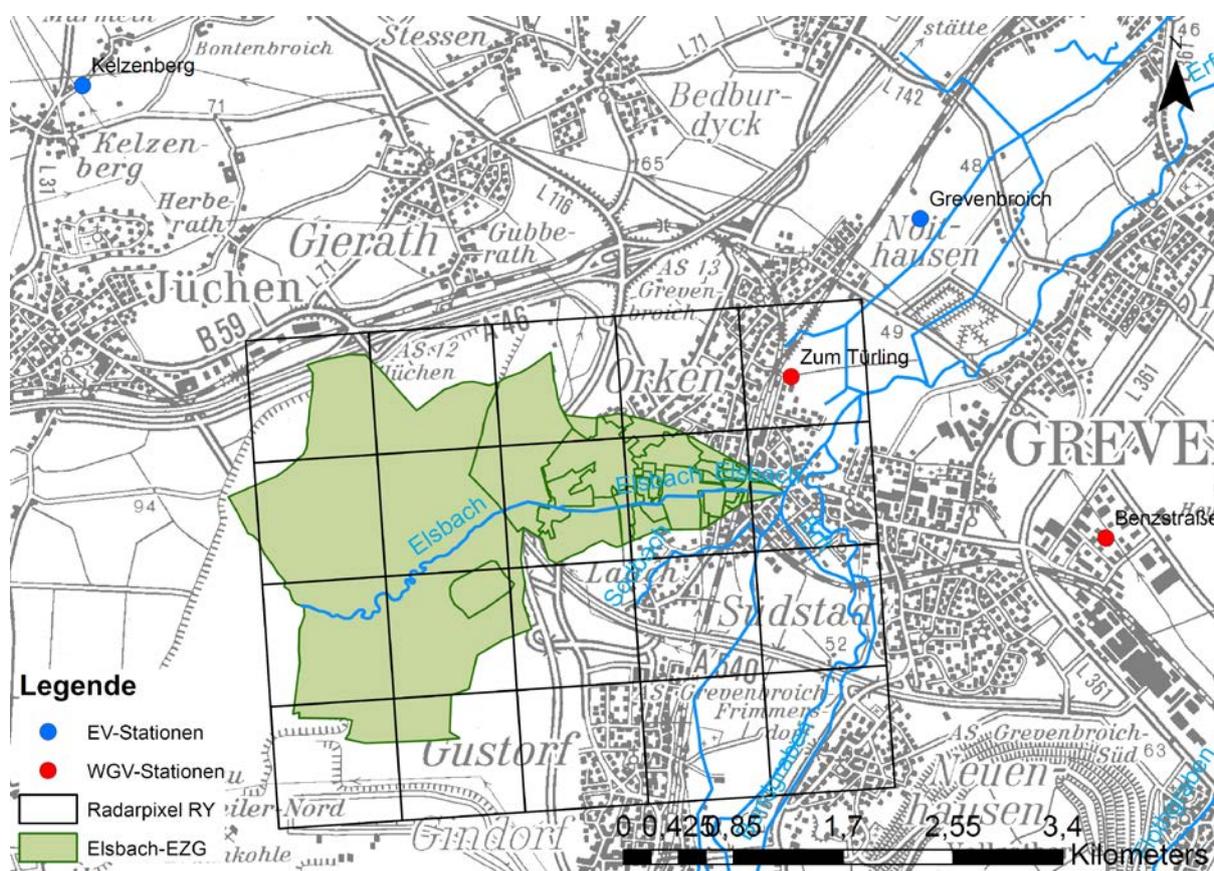


Abb. 3: Verfügbare Niederschläge im Messzeitraum der Abflussmesskampagne

Die Güte der Berechnungsergebnisse des NA-Modells wurde für fünf Niederschlagszenarien untersucht, die in Tabelle 1 zusammen gefasst sind. In den Szenarien 1 bis 4 wurden die Messstandorte, Polygonschwerpunkte der Flächen mit den interpolierten Zeitreihen bzw. Radarpixelschwerpunkte den Teilgebieten nach der Nearest-Neighbor Methode automatisch zugeordnet. Im fünften Szenario wurde eine manuelle Zuordnung der Stationsniederschläge vorgenommen. Die Interpolation der Niederschläge in Szenario 3 erfolgte auf Basis von sie-

ben EV-Stationen nach dem IDW-Verfahren. Von den sieben Stationen wurden drei Stationen aufgrund der Entfernung zum Untersuchungsgebiet nur schwach gewichtet.

Tab. 1: Niederschlagsszenarien zur Bewertung der Modellgüte

	Datenbasis	Niederschlagszuordnung	Verwendete Niederschläge
Szenario 1	EV-Stationen	Nearest-Neighbor	Kelzenberg, Grevenbroich
Szenario 2	WGV-Stationen	Nearest-Neighbor	Zum Türling
Szenario 3	Interpolierte Teilgebietsniederschläge	Nearest-Neighbor	3 interpolierte Zeitreihen
Szenario 4	Radolan-RY des DWD	Nearest-Neighbor	6 Radarzeitreihen
Szenario 5	EV-WGV-Stationen	Manuelle Zuordnung	Kelzenberg, Zum Türling

### 3. Simulationsergebnisse

Abbildung 4 zeigt die Simulationsergebnisse der fünf Niederschlagsszenarien für das ausgewählte Abflussereignis vom 08./09.07.2014 mit den originalen Niederschlägen und Versiegelungsgraden bei Eichfaktor 1,0.

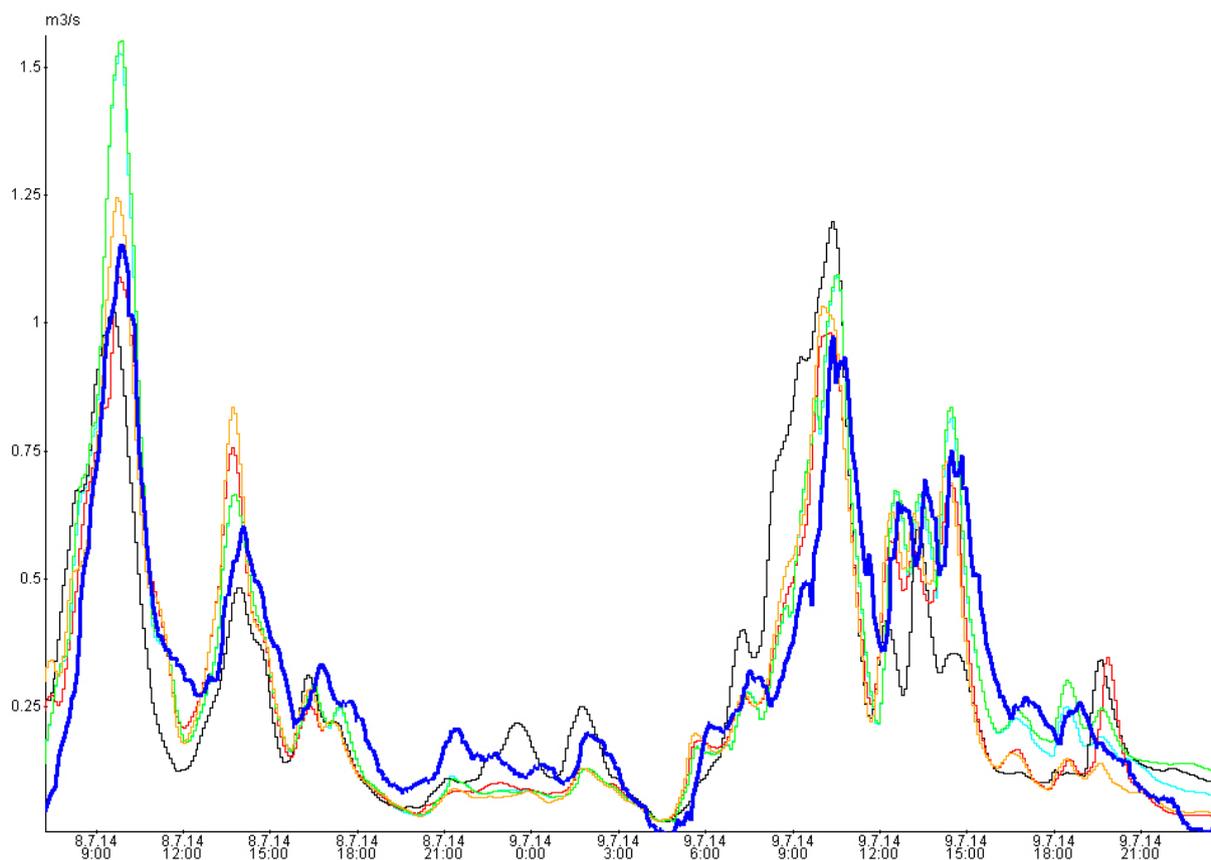


Abb. 4: Gemessener Abfluss (blau) und Simulationsergebnisse der fünf Niederschlagsszenarien: 1 = orange, 2 = grün, 3 = rot, 4 = schwarz, 5 = türkis (original Versiegelungsgrade und Niederschläge)

Insgesamt betrachtet lässt sich feststellen, dass das beobachtete Abflussgeschehen in dem kleinen, urban geprägten Einzugsgebiet relativ gut durch das Modell abgebildet wird. Bezo-

gen auf die Scheitelwerte der beiden höchsten Abflussereignisse am 8. und 9. jeweils gegen 10:00 Uhr liefern die Niederschläge aus den Szenarien 1 und 3 (vgl. Tabelle 1) die besten Anpassungen. Die Verwendung der Niederschläge aus den Szenarien 2 und 5 führen zu einer deutlichen Überschätzung des Ereignisses am 8. Juli. Ursache hierfür könnten eine systematische Überschätzung der Niederschläge bei hohen Intensitäten durch die WGV-Stationen oder nicht durch das Modell abgebildete Retentionseffekte sein. Bei der kleineren Abflussspitze am Nachmittag desselben Tages kehrt sich das Verhältnis um. Die Szenarien 2 und 5, die zunächst zu einer Überschätzung des Abflusses führten zeigen hier die bessere Anpassung und die Szenarien 1 und 3 führen zu einer Überschätzung. Am schlechtesten wird die Abflussdynamik bei Verwendung der unangeeichten Radardaten erfasst. Hier scheinen die Unsicherheiten bezüglich der Niederschlagsmengen bei den Radardaten die vermeintlich bessere Erfassung der räumlichen Heterogenität des Niederschlags zu überwiegen. Ob die Ursache für die Unsicherheit in der Abflussmodellierung in der räumlichen Heterogenität des Einzugsgebietes (Über- oder Unterschätzung der Versiegelungsgrade der einzelnen Siedlungsflächen) oder in der räumlichen Heterogenität des Niederschlags (Über- oder Unterschätzung der Niederschlagsmengen oder -intensitäten bei der Übertragung von Punktinformationen auf die Teilgebietsflächen) liegt, lässt sich aufgrund der vorliegenden Informationen nicht abschließend sagen.

Um der Frage nachzugehen, ob die Unsicherheit bei der Abflussmodellierung auf überschätzte Niederschlagsintensitäten oder überschätzte Versiegelungsgrade zurück zu führen ist, wurden die Eichfaktoren der Versiegelungsgrade und der Niederschläge in den verschiedenen Niederschlagsszenarien systematisch variiert. Während der Variation des einen Parameters wurde der andere Parameter mit Eichfaktor 1,0 festgesetzt. Die Versiegelungsgrade wurden für alle Siedlungsflächen gemeinsam variiert, die Niederschläge für alle Teilgebiete des Elsbachmodells. Die Bewertung der Güte der Berechnungsergebnisse erfolgte mit Hilfe des Nash-Sutcliffe-Koeffizienten (NASH & SUTCLIFFE, 1970) und dem Abgleich des simulierten Abflussvolumens mit dem gemessenen.

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der Simulationsauswertung für die Variation des Eichfaktors "Versiegelungsgrad". Die schlechte Modellperformance bei Verwendung der unangeeichten Radardaten, die sich bereits beim visuellen Vergleich der Ganglinien zeigte (vgl. Abbildung 4), wird durch den Nash-Sutcliffe-Koeffizienten (NSE) bestätigt. Hinsichtlich der Anpassungsgüte unterscheiden sich die Szenarien 2,3 und 5 beim Eichfaktor 1,0 nur unwesentlich. Während das Szenario 3 (interpolierte Teilgebietsniederschläge) jedoch bei diesem Eichfaktor den höchsten NSE aufweist, lässt sich für die Niederschlagsszenarien 2 und 5 bei einem Eichfaktor 0,9 für den Versiegelungsgrad die beste Anpassungsgüte erzielen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei Reduzierung der Versiegelungsgrade weniger Niederschlag direkt zum Abfluss kommt und somit die Überschätzung der Abflussspitzen für diese Szenarien reduziert wird. Vergleicht man das simulierte mit dem gemessenen Abflussvolumen zeigt sich, dass die Szenarien 2 und 5, die die Abflussspitzen eher überschätzen, das Gesamtvolumen am besten abbilden, während die anderen drei Szenarien das Volumen unterschätzen. Die manuelle Stationszuordnung (Szenario 5) trifft das gemessene Abflussvolumen von  $44.342\text{m}^3$  sogar bei Eichfaktor 1,0 fast auf den Punkt.

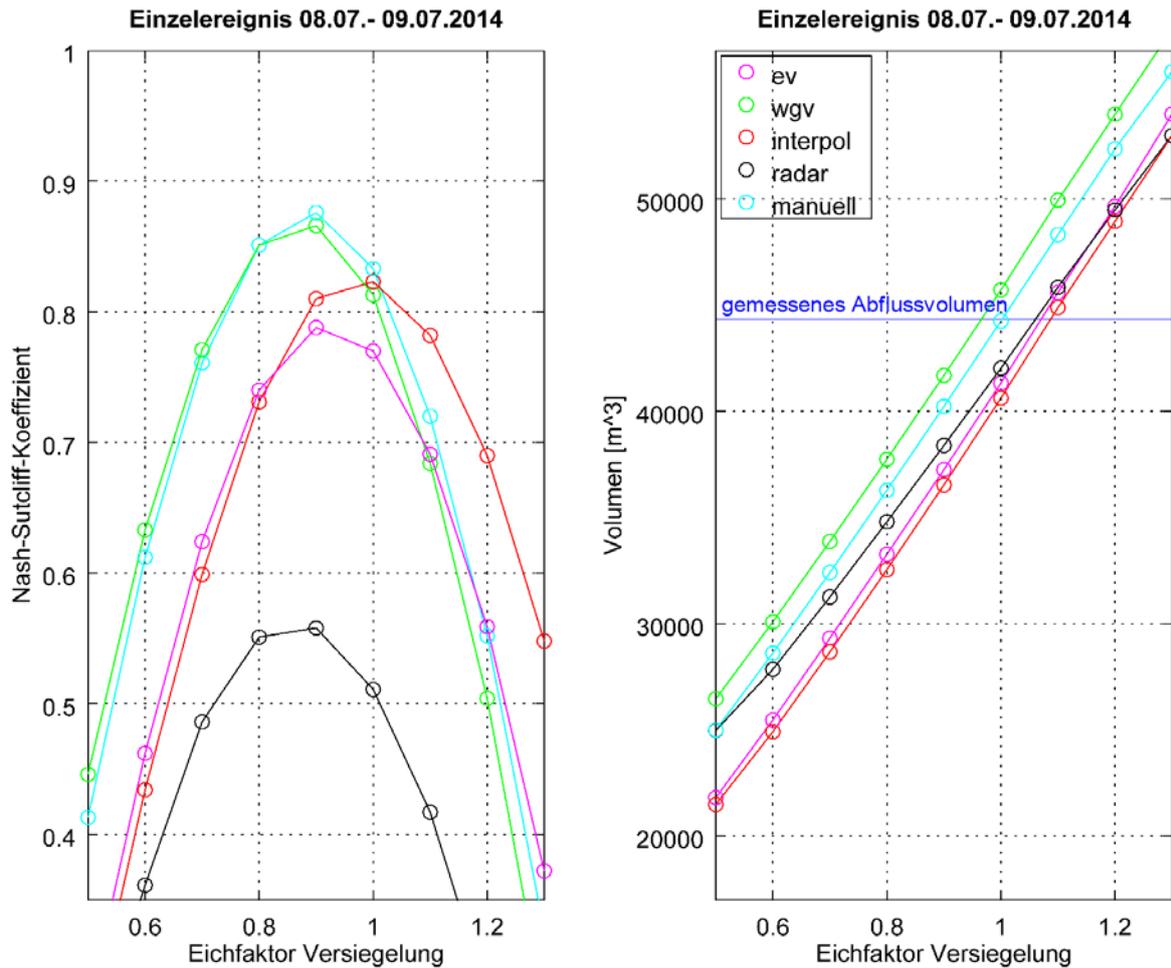


Abb. 5: Bewertung der Modellanpassung bei Variation des Versiegelungsgrades hinsichtlich Nash-Sutcliffe-Koeffizient und Abflussvolumen

Insgesamt betrachtet liegt das Optimum für den NSE bei einem Eichfaktor für den Versiegelungsgrad von 0,9 (4 von 5 Niederschlagsszenarien). Um das Volumen hingegen optimal abzubilden, müssen die Eichfaktoren je nach Niederschlagsszenario in etwa zwischen 0,95 und 1,10 liegen. Dies scheint darauf hinzudeuten, dass einerseits das Abflussgeschehen auf den urbanen Flächen überschätzt wird, andererseits auf den natürlichen Flächen zu wenig Niederschlag direkt zum Abfluss kommt. Um diesen genauer klären zu können, wäre eine Abflussmessung oberhalb der Einleitungen der Siedlungsentwässerung erforderlich.

Beispielhaft für alle Simulationsergebnisse der fünf Niederschlagsszenarien, zeigt Abbildung 6 die Simulationsbandbreite der Abflusszeitreihen der manuellen Stationszuordnung bei Variation des Versiegelungsgrades. Die gemessene Zeitreihe (blau) wird hier der besten Simulation nach Gütekriterium Nash-Sutcliffe-Koeffizient bei Eichfaktor 0,9 (rot) gegenübergestellt. Die Simulation erreicht eine Modellgüte von NSE= 0,88. Das Abflussvolumen wird bei dieser Simulation jedoch unterschätzt.

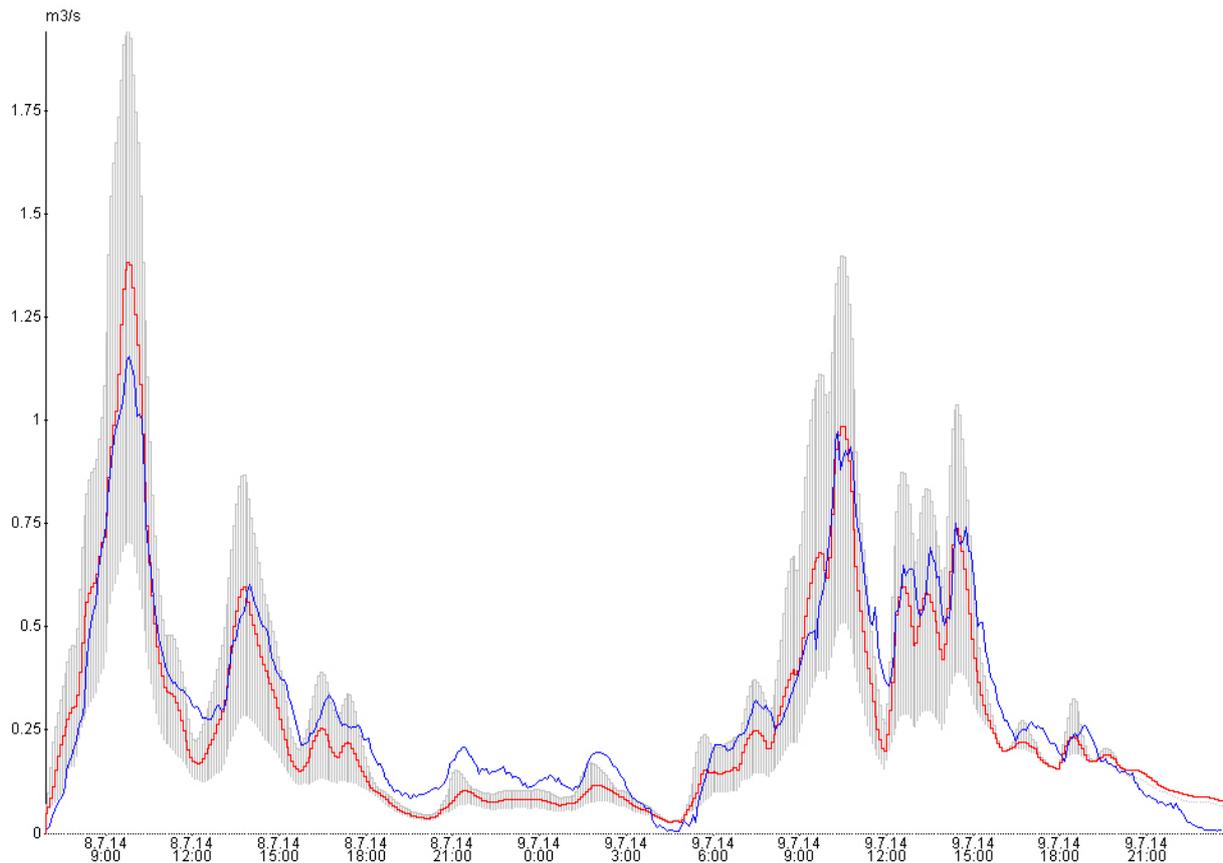


Abb. 6: Simulationsbandbreite der berechneten Abflüsse bei Verwendung des Niederschlagsszenarios 5 (manuelle Stationszuordnung) und Variation des Eichfaktors „Versiegelungsgrad“ zwischen 0,5 und 1,3 Blau: gemessene Abflusszeitreihe, rot: simulierte Abflusszeitreihe für die beste Anpassung des Nash-Sutcliffe-Koeffizienten bei Eichfaktor 0,9

Bei Variation des Eichfaktors „Niederschlag“ ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der Variation des Eichfaktors „Versiegelungsgrad“ (vgl. Abbildung 7). Da der Eichfaktor des Versiegelungsgrades bei der Variation des Niederschlages auf 1,0 festgesetzt wird, sind die Werte bei Eichfaktor 1,0 in dieser Abbildung identisch mit den Werten in Abbildung 5. Erst Eichfaktoren größer/kleiner 1,0 führen zu anderen Anpassungsgüten. Der höchste Nash-Sutcliffe-Koeffizient wird bei einer Reduktion des Niederschlages um 10% erzielt. Dies führt jedoch auch zu einer deutlicheren Unterschätzung des Abflussvolumens. Eine weitere Variation des Niederschlages, insbesondere die Erhöhung, führt bei einer Beibehaltung der Versiegelungsgrade, schnell zu deutlich schlechteren Modellgüten. Dies könnte ebenfalls darauf hindeuten, dass das Abflussgeschehen auf den urbanen Flächen überschätzt wird, was bis zu einem gewissen Grad durch eine Reduktion des Niederschlages kompensiert werden kann. Für eine abschließende Beantwortung der Frage, ob das Abflussgeschehen falsch abgebildet wird oder Fehler in der Niederschlags- oder Abflussmessung vorliegen, sind jedoch genauere Untersuchungen erforderlich.

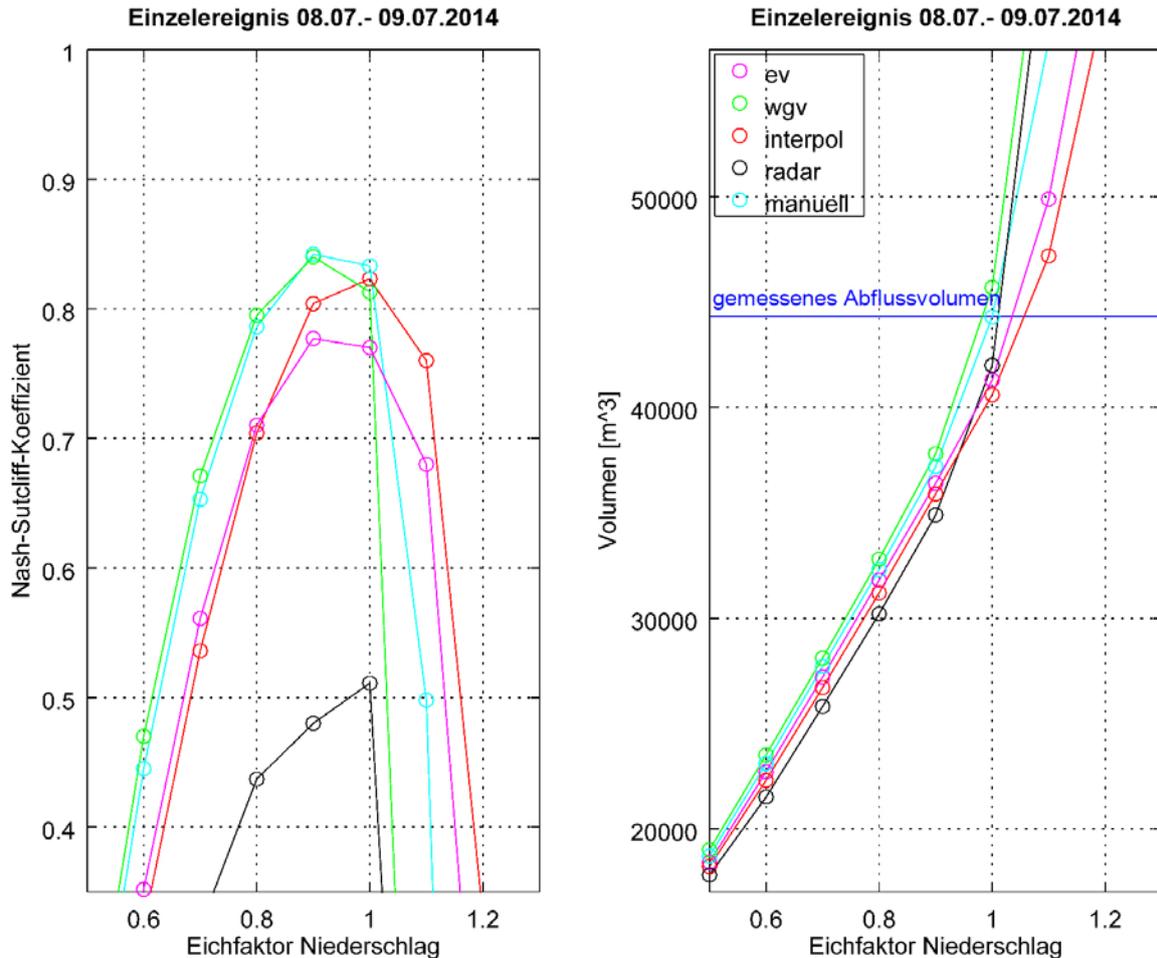


Abb. 7: Bewertung der Modellanpassung bei Variation des Niederschlags hinsichtlich Nash-Sutcliffe-Koeffizient und Volumen

#### 4. Fazit

Die heterogenen Strukturen der Stadtgebiete und die räumliche Verteilung des Niederschlags erfordern immer kleinräumigere Betrachtungen, um die heutigen Fragestellungen der (Siedlungs-)Wasserwirtschaft mittels Modelltechnik beantworten zu können. Gleichzeitig sind sowohl Niederschläge als auch Versiegelungsgrade in stadthydrologischen Untersuchungen sensitive Eingangsgrößen, deren Erhebung große Bedeutung zukommt. Eine Möglichkeit die heterogenen Stadtgebiete zu erfassen, bieten Messkampagnen bei denen sowohl Niederschläge im Stadtgebiet als auch die entsprechenden Abflüsse an der jeweiligen Einleitstelle gemessen werden. Die räumliche Verteilung der Niederschläge lässt sich in der Regel gut anhand von Radardaten erfassen.

Um der räumlichen Struktur der Siedlungsflächen Rechnung zu tragen, wurden die Stadtflächen daher für die Untersuchung auf bauwerksscharf abgegrenzte Gebiete herunter gebrochen und mit den aktuellsten Versiegelungsgraden versehen. Zusätzlich wurde versucht das Modell anhand der gemessenen Abflüsse unter Berücksichtigung verschiedener Niederschlagsinformationen zu plausibilisieren.

Obwohl das Modell das Abflussgeschehen der beobachteten Abflüsse grundsätzlich gut abbilden kann, geht aus der Untersuchung nicht abschließend hervor, ob die Niederschläge

oder die Versiegelungsgrade über- bzw. unterschätzt werden. Ursache hierfür sind unter anderem der kurze Messzeitraum mit nur einem längeren und vollständig aufgezeichneten Abflussereignis und die unzureichende räumliche Auflösung der Messkampagne. Die summarische Erfassung der Abflüsse aller städtischen Einleitstellen sowie der Abflüsse aus Sumpfung- und Spülwassereinleitungen lässt keinen Rückschluss zu, ob der Versiegelungsgrad einzelner Stadtgebiete wirklichkeitsnah erfasst wurde. Das gleichzeitige Über- und Unterschätzen der Abflussspitzen innerhalb eines Niederschlagsszenarios lässt jedoch darauf schließen, dass hier eine pauschale Abminderung der Versiegelungsgrade über den Eichfaktor nicht zielführend ist. In dieser Untersuchung blieben die ebenfalls kanalnetzstrukturabhängigen Fließzeiten unberücksichtigt. Wie bei den Versiegelungsgraden würden gezielte Messkampagnen einzelner Stadtgebiete auch Aufschluss über die Fließzeiten in der Fläche geben. Interessant wäre an dieser Stelle beispielsweise eine Untersuchung teilgebietsbezogener Variationen von Versiegelungsgraden, Fließzeiten und Niederschlägen mittels Monte-Carlo-Simulation, um die Heterogenität des Einzugsgebietes und die Parameterinteraktionen zu erfassen und anhand weiterer Messkampagnen auszuwerten. Der Versuch die räumliche Heterogenität der Niederschläge mittels unangeeichter Radardaten zu erfassen, war in dieser Untersuchung nicht erfolgreich. Es ist davon auszugehen, dass an Stationsdaten angeeichte Radardaten, die zum Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht vorlagen, zu besseren Ergebnissen führen können.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass bezüglich der Quantifizierung von Unsicherheiten in der Simulation urbaner Gebiete und der Separation der Unsicherheiten in den Modelleingangsgroßen von strukturellen Modelldefiziten noch weiterer Untersuchungsbedarf besteht (DEL GIUDICE et al., 2013).

## Literatur

- DEL GIUDICE, D., HONTI, M., SCHEIDEGGER, A., ALBERT, C., P. REICHERT, P. & RIECKERMANN, J. (2013): Improving uncertainty estimation in urban hydrological modeling by statistically describing bias. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 4209–4225.
- GATTKER, C. & SCHUMANN, A. (2007): Comparison of different approaches to quantify the reliability of hydrological simulations. *Adv. Geosci.*, Vol. 11, 15–20.
- GATTKER, C., SCHOLTEN, A. & BANGEL, H. (2015): Umsetzung der EG-WRRRL unter veränderlichen wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen – die Erft-Verlegung in Bergheim als erste Maßnahme des Perspektivkonzepts Untere Erft. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, Jg. 8, Nr. 12, 762–767.
- HYDROTEC INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR WASSER UND UMWELT MBH (2015): NASIM Benutzerdokumentation, Version 4.4.3.
- NASH, J.E. & SUTCLIFFE, A.Y. (1970): River flow forecasting through conceptual models 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- SCHAARDT, V. (2012): Vergleich hydrologischer und hydrodynamischer Kanalnetzberechnungen und Konsequenzen für die praktische Anwendung. *Mitteilungen - Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München*, Heft 119, 192 S.
- UHLNBROOK, S. (2005): Von der Abflussbildungsprozessforschung zur prozessorientierten Modellierung – ein Review. *Hydrologie und Wasserwirtschaft* 49(1), 13-24.



## Auswirkungen räumlich variabler Niederschläge auf die Sturzflutsimulation

Simon Lumassegger, Stefan Achleitner, Bernhard Kohl, Herbert Formayer, Alexander Strehz, Thomas Einfalt

### Zusammenfassung

Die Zunahme lokaler Starkregenereignisse in der Zukunft, insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels, ist eine Fragestellung die im laufenden Forschungsprojekt SAFFER-CC gestellt wird. Auf Basis aktueller Klimawandelmodelle und Projektionen daraus ist eine genaue Lokalisierung von Niederschlagsereignissen nicht möglich. Daraus abgeleitet, besteht die Notwendigkeit Niederschlags-szenarien mit höherer räumlicher Auflösung zu entwickeln. In einem ersten Schritt wird die Sensitivität der Modellierung hinsichtlich verschiedener Niederschlagsszenarien geprüft. Reale Starkregenereignisse werden durch Verschiebung des Gewitterschwerpunktes um wenige Kilometer modifiziert und damit der Einfluss der räumlichen Niederschlagsverteilung auf die Wasserstände und Überflutungsflächen untersucht. Die Auswahl des Pilotgebietes erfolgte anhand eines aktuellen Starkregenereignisses, welches zu massiven Sturzflutschäden in Wallern an der Trattnach (Oberösterreich) führte.

### 1. Einleitung

Nach zwei Jahrhunderthochwassern (2002, 2013) an der Donau werden in der öffentlichen Wahrnehmung Hochwasserkatastrophen meistens mit Flusshochwasser gleichgesetzt. Das Überschwemmungsrisiko an Flüssen wurde in den letzten Jahren weitreichend erfasst und damit auch die Errichtung von Hochwasserschutzmaßnahmen vorangetrieben. Die Gefahr von pluvialen Überflutungen fernab von Gewässern blieb dabei weitgehend unbehandelt, wobei deren Gefahrenpotential im Alpen und Alpenvorland nicht geringer einzustufen ist. Laut MUNICH RE (2015) ist der individuelle Schaden eines einzelnen Sturzflutereignisses zwar gering, im langjährigen Mittel gesehen sind die Schadenssummen verglichen mit den Jahrhundertereignissen an großen Flüssen allerdings äquivalent. Dabei ist die volkswirtschaftliche Schadenssumme resultierend aus Sturzflutereignissen beträchtlich. Diese Sturzfluten entstehen im Regelfall durch kurzzeitige, kleinräumige Starkregenereignisse mit extremen Intensitäten. Die Auswirkungen derartiger Gewitterzellen sind meistens auf wenige Quadratkilometer beschränkt, worauf die geringe mediale Präsenz dieser Naturkatastrophen zurückzuführen ist.

Dennoch sind weite Regionen in Mitteleuropa betroffen, die sich bei extremen Niederschlagsereignissen und ungünstigen Vorbedingungen in Kombination mit lokaler Topographie als massiv sturzflutgefährdet erweisen. Durch den Klimawandel bedingt, wird in Zukunft mit einem häufigeren Auftreten von derartigen Extremereignissen zu rechnen sein.

Aus diesem Grund wurde das Forschungsprojekt SAFFER-CC initiiert, in welchem die Auswirkungen des Klimawandels auf Sturzfluten in Oberösterreich untersucht werden. Kern dieses Projektes ist durch interdisziplinäre Zusammenarbeit in den Gebieten Meteorologie, Hydrologie und Hydraulik die Sturzflutsimulation zu verbessern und auf Basis aktueller Klimawandelmodelle Prognosen zur Häufigkeit zukünftiger Sturzflutereignisse zu treffen.

Hier ergibt sich die Problematik unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Skalen der Niederschlagsdaten in der Messung und Klimamodellierung. Klassische Downscaling-Methoden lassen keine Ableitung von Intensitäten und Dauerstufen zu, wie sie in der Sturzflutmodellierung relevant sind. Alternativ wird hier der Ansatz gewählt, der auf der Nutzung von räumlich

und zeitlich hochauflösenden Gewitterzellen basiert, welche die Ausgangsbasis für die Sturzflutmodellierung bilden.

Aus den Klimadaten soll die Häufigkeit des Auftretens und/oder etwaige Intensitätsveränderungen abgeleitet werden. Die räumliche Verteilung der Niederschläge spielt bei Abflussbildung und -konzentration von Sturzfluten eine entscheidende Rolle. Die genaue Lokalisierung sowie die Festlegung der räumlichen Verteilung eines Starkregenereignisses sind auf Basis der Klimamodellierung nicht direkt möglich. Daher müssen räumlich variierende Szenarien gebildet werden. In der vorliegenden Arbeit werden erste Untersuchungen vorgestellt, die sich mit der Sensitivität von Überflutungssimulationen auf unterschiedlich verteilte Niederschläge befassen. Beim untersuchten Niederschlagsereignis vom 08.06.2015 wurden in Waltern an der Trattnach extreme Niederschlagsintensitäten aufgezeichnet, während im zwei Kilometer entfernten Nachbarort Bad Schallerbach keine außergewöhnlichen Niederschlagsintensitäten registriert wurden. Hier stellt sich die Frage, welche Bandbreite an Wasserständen im Simulationsgebiet durch räumliche Variation des Niederschlagsfeldes möglich ist.

## **2. Methodik**

### **2.1 Kopplung hydraulischer und hydrologischer Modellierung**

Die Sturzflutsimulation wurde mit dem Programm Sturzflut\_v1.6 (KLAR et al. 2014) durchgeführt. Das Programm Sturzflut ist eine Erweiterung von Hydro\_AS-2D zur räumlichen Berücksichtigung von Starkregenereignissen in einem hydrodynamischen Simulationsmodell. Sturzflut\_v1.6 basiert auf der Programmiersprache Visual Basic, als Parameter müssen Regenganglinien, Verlustansätze und Hauptzeitschritte eingegeben werden. Die gesamte Simulationszeit wird in sogenannte Hauptzeitschritte geteilt, an denen das hydraulische Modell angehalten wird. Entsprechend dem in diesem Zeitschritt bilanzierten Effektivniederschlag (Niederschlag-Verluste) wird der Wasserstand modifiziert. In der Berechnung dient jeweils der adaptierte Endzustand des letzten Hauptzeitschritts zum Start des nächsten Rechenlaufs als Anfangsbedingung, als Rechenkern wird Hydro\_AS-2D verwendet. Die Wahl des Hauptzeitschrittes beeinflusst maßgeblich die Berechnungsdauer. Sehr kleine Hauptzeitschritte führen nicht automatisch zu einer Verbesserung der Ergebnisqualität. Es wurden grundsätzlich bei kurzen Hauptzeitschritten sehr hohe Gesamtrechenzeiten und eine geringere Genauigkeit in der Massenbilanz festgestellt. Der Hauptgrund liegt dabei in Rundungsfehlern beim Datenaustausch und geringen Niederschlagsmengen in einem Zeitschritt die mit der Anzahl der Iterationen ansteigen. In Sturzflut\_v1.6 können Verluste und Niederschlagsganglinien für jeden einzelnen Netzknoten angegeben werden. In der praktischen Anwendung werden Regenfelder in Abhängigkeit der vorhandenen Eingangsdaten definiert. Bei Verwendung der INCA-Analysedaten (HAIDEN et al., 2009) ergibt sich somit ein Regenzonenraster mit einer Auflösung von einem Quadratkilometer.

In der vorliegenden Arbeit wurden einfache Verlustansätze wie Anfangs- und Dauerverlust und das SCS-CN (USDA, 1985) Verfahren genutzt. Es erfolgt eine Bilanzierung des infiltrierten Niederschlags, wodurch kontinuierliche Verluste und Oberflächenabflussanteile simuliert werden können. Die hier angewendeten Modelle zielen auf die Reduktion des Bruttoniederschlags ab, wobei grundsätzlich eine Infiltrationsmodellierung auf Basis des vorherrschenden Wasserstandes möglich ist. Eine derartige Erweiterung ist zukünftig vorgesehen in der

auch etablierte Verlustansätze wie ZEMOKOST (KOHL 2009) implementiert werden. Dabei werden im Zuge des Forschungsprojektes SAFFER-CC Berechnungsversuche in den Pilotgebieten durchgeführt die zur Kalibrierung der Verlustmodelle und zur Berücksichtigung von Landnutzung und Bodeneigenschaften dienen.

## **2.2 Niederschlagsszenarienanalysen unter Berücksichtigung von Klimaprojektionen**

Selbst die jüngste Generation von regionalen Klimamodellen mit einer räumlichen Auflösung von rund 12 km sind nicht in der Lage konvektive Zellen explizit zu berechnen und damit belastbare Aussagen über die raum/zeitliche Struktur der Niederschlagsintensität in derartigen Zellen zu geben. Konvektionsauflösende Modelle werden derzeit erst in meteorologischen Anwendungen zu Wettervorhersage erprobt (PREIN et al., 2015), sind aber nicht Teil von Klimaprojektionen. Um dennoch Aussagen über die zukünftige Entwicklung von Starkniederschlagsereignissen machen zu können, wird einerseits das sogenannte Clausius-Clapeyron-Scaling verwendet und andererseits die Veränderung der Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen anhand eines Labilitätsindex geschätzt.

Das Clausius-Clapeyron-Scaling (CC-Scaling) basiert auf dem Umstand, dass die Fähigkeit der Luft Wasserdampf zu halten temperaturabhängig ist und in etwa um 7 % je Grad Temperaturanstieg zunimmt. Zahlreiche Arbeiten weltweit (MUSCHINSKI & KATZ, 2013; LENDE-RINK et al., 2010) als auch für Österreich (FORMAYER & FRITZ 2015) haben gezeigt, dass Starkniederschläge von einer Stunde Dauer bei der Niederschlagsintensität zumindest auch diese Temperaturabhängigkeit zeigen und teilweise sogar einen stärkeren Anstieg aufweisen.

CC-Scaling liefert zwar Information über die Veränderung der Niederschlagsintensität von Starkniederschlägen, aber nicht über die Häufigkeit des Auftretens. Um diese mögliche Veränderung abzuschätzen wird in SAFFER-CC als Labilitätsindikator der Showalter-Index (SHOWALTER, 1947) verwendet. Der Vorteil des Showalter-Indexes ist, dass er aus den Standardfeldern von Regionalen Klimamodellen berechnet werden kann und gut für Gebirgsregionen geeignet ist. Damit können alle Modelle aus der EURO-CORDEX Datenbank (JAKOB et al., 2013) in die Studie eingebunden werden.

In einem ersten Schritt werden statistische Zusammenhänge zwischen historischen Starkniederschlagsereignissen in der Versuchsregion und den dazugehörigen Showalter Indizes abgeleitet. In einem zweiten Schritt werden dann Häufigkeitsanalysen relevanter Showalter Indexwerte unter heutigen und unter Klimawandelbedingungen durchgeführt.

Durch die Zusammenführung der Informationen aus dem CC-Scaling und den Analysen der Showalter Indexwerte kann ein umfassendes Bild über die Entwicklung von Starkniederschlagsereignissen in der Versuchsregion entworfen werden. Die räumliche Auflösung von 12km lässt keine genaue Lokalisierung zu, wodurch der Ort des Auftretens als gleich wahrscheinlich anzusehen ist. Die Kleinräumigkeit solcher Ereignisse ist jedoch gegeben wodurch eine flächige Anwendung hoher Regenintensitäten zu Überschätzungen führt. Die gewählte Vorgehensweise erlaubt es die räumliche Variabilität und Ausprägung von Gewitterzellen zu berücksichtigen. Im Zuge dieser Arbeit werden deshalb, verschiedene Niederschlagsszenarien mittels Verschiebung des Schwerpunktes einer Gewitterzelle simuliert. In der hier ge-

zeigten Vorstudie wurde ein beobachtetes Ereignis verwendet dessen räumliche Verteilung in einem Raster mit einer Auflösung von einem Kilometer als INCA Analysedaten vorliegen.

### 3. Gebietsbeschreibung - Wallern an der Trattnach

#### 3.1. Gebietsabgrenzung und Parametrisierung

Wallern an der Trattnach befindet sich im Bezirk Grieskirchen in Oberösterreich und wurde aufgrund eines aktuellen Sturzflutereignisses vom 08.06.2015 ausgewählt. Zur Sturzflutmodellierung kommt ein Berechnungsnetz von den Gemeinden Wallern an der Trattnach und Bad Schallerbach zur Anwendung. Neben dem digitalen Höhenmodell orientiert sich die Zelleinteilung an der Landnutzungskarte (Abbildung 1). Das Einzugsgebiet entwässert Richtung Süden, die Wasserscheide verläuft ungefähr entlang der nördlichen Gebietsumgrenzung. Insgesamt wurde ein Gebiet von 15,8 km<sup>2</sup> modelliert.

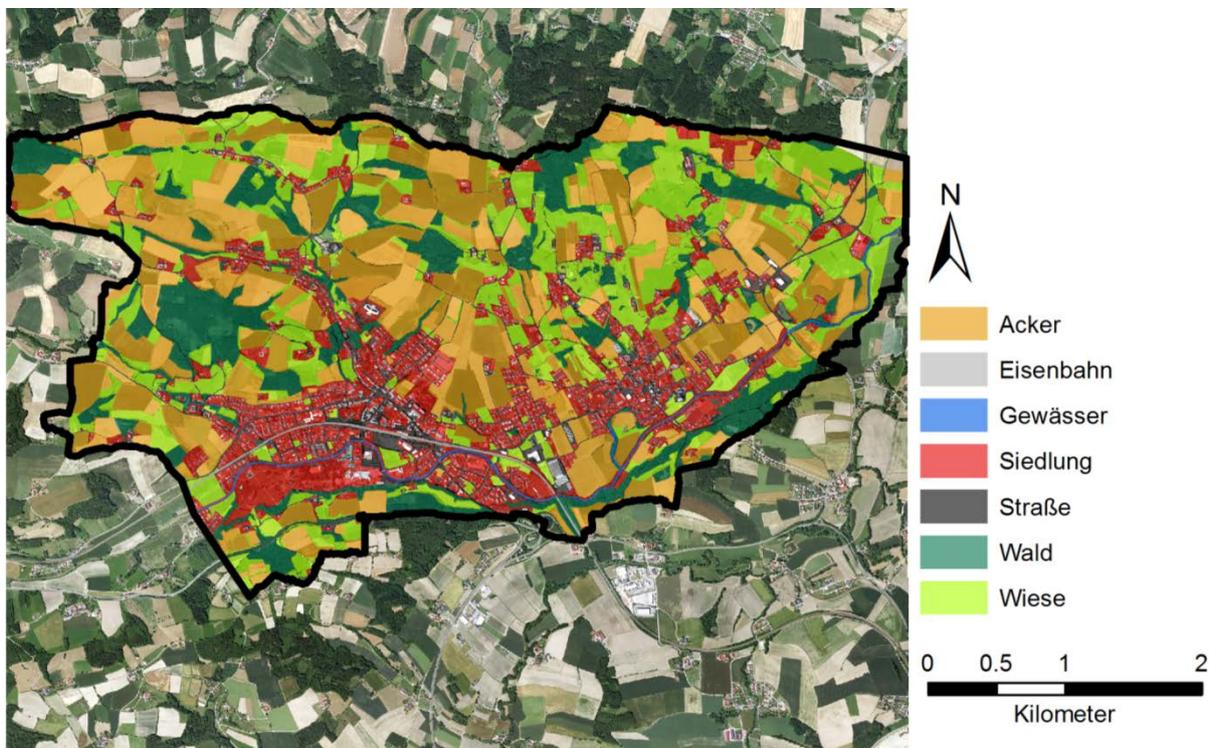


Abb. 1: Landnutzungskarte des modellierten Gebietes

Als Verlustmodell diente das SCS-CN Verfahren, die Wahl der CN-Werte basierte auf Grundlage der Landnutzungstypen, welche für diese erste Voruntersuchung vereinfacht und ohne Berücksichtigung von Bodeneigenschaften abgeschätzt wurden (Tabelle 1).

Im Berechnungsnetz wurden die Gebäudeflächen ausgestanzt, wodurch kein Niederschlag über diesen Flächen eingetragen wird (Abbildung 2). Zur Berücksichtigung des Niederschlages über Gebäudeflächen müsste dieser aliquot an den angrenzenden Netzelementen aufgeschlagen werden was im Rahmen dieser Vorstudie vernachlässigt wurde. Insgesamt ist zu sagen, dass Gebäudeflächen bezogen auf das Gesamtgebiet nur einen minimalen Anteil ausmachten und lokale Dachflächenversickerungen ebenfalls zu erwarten sind.

Tab. 1: Simulationsparameter

Bezeichnung	CN	AV	$k_{St}$
[-]	[-]	[ mm ]	[ $m^{1/3}/s$ ]
Eisenbahn	90	3	15
Siedlung	83	4.5	20
Gewässer	100	0	30
Acker	87	1.9	14
Wald	66	6	6
Wiese	71	4.3	8
Straße	98	2.6	60

Durch Verfeinerung des Berechnungsnetzes in den besiedelten Gebieten konnte eine Auflösung von 1m in den sturzflutrelevanten Bereichen erreicht werden. Für das restliche Gebiet wurde eine Auflösung von 4m verwendet, um die Anzahl der Netzelemente und damit auch die Berechnungsdauer zu reduzieren. Die Ermittlung der Rauheit erfolgte analog zu den CN-Werten auf Basis der Landnutzungskarten, die gewählten Stricklerbeiwerte können aus Tabelle 1 entnommen werden. Auf eine detaillierte Modellierung des Kanals wurde in dieser Arbeit verzichtet. Als vereinfachter Ansatz für rurale Gebiete wurde deshalb in den Straßen und Siedlungsgebieten ein größerer Anfangsverlust gewählt. Eine detaillierte Modellierung des Kanals erscheint insofern nicht zielführend, da die Einlaufkapazitäten an Einlaufschächten aufgrund der extremen Intensitäten deutlich überschritten wurden. Zusätzlich führte das Ausspülen der Ackerflächen zu Verklausungen von Rohrleitungen und Einlaufschächten. Für eine primär im urbanen Bereich ablaufende Sturzflutmodellierung wäre eventuell eine vollständige Modellkopplung zwischen Kanal und Oberflächenabfluss sinnvoll, wobei Einlaufkapazitäten auch hier relevant sind.



Abb. 2: Simulationsnetz mit ausgestanzter Gebäudefläche

### 3.2 Charakterisierung des Niederschlagsereignisses

Zur Analyse des Niederschlagsereignisses vom 08.06.2015 wurden die INCA-Niederschlagsdaten herangezogen. Es standen Viertelstundenwerte des Niederschlages mit einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer zur Verfügung. Die INCA Daten konnten mit gemessenen Niederschlagssummen im Projektgebiet plausibilisiert werden. In Abbildung 3 sind die

INCA Analysedaten für das modellierte Gebiet dargestellt, die maximale Niederschlagssumme betrug 125 mm in 6 Stunden.

**Ereignisbasierte Niederschlagssummen**  
Basis: INCA 15 Minutenwerte

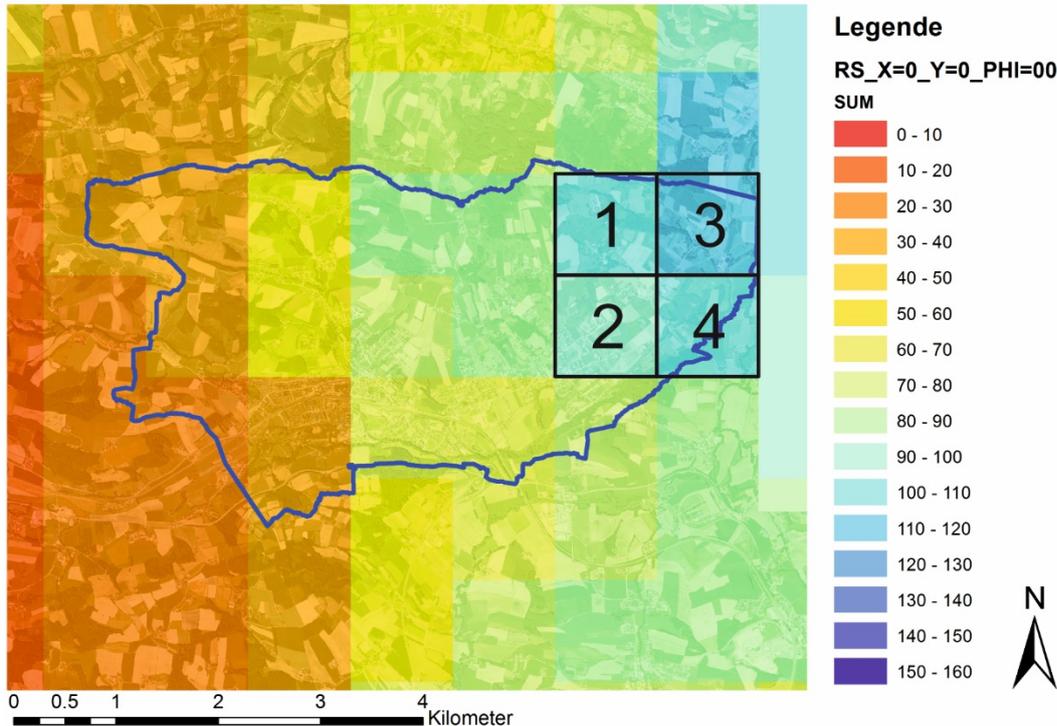


Abb. 3: Niederschlagssummen in Wallern an der Trattnach aus INCA Analysedaten

Betrachtet man den Niederschlagsverlauf so kann das Ereignis als anfangs betont mit einer einstündigen Extremniederschlagsphase charakterisiert werden. In Abbildung 4 ist der Niederschlagsverlauf ausgewählter Rasterzellen dargestellt.

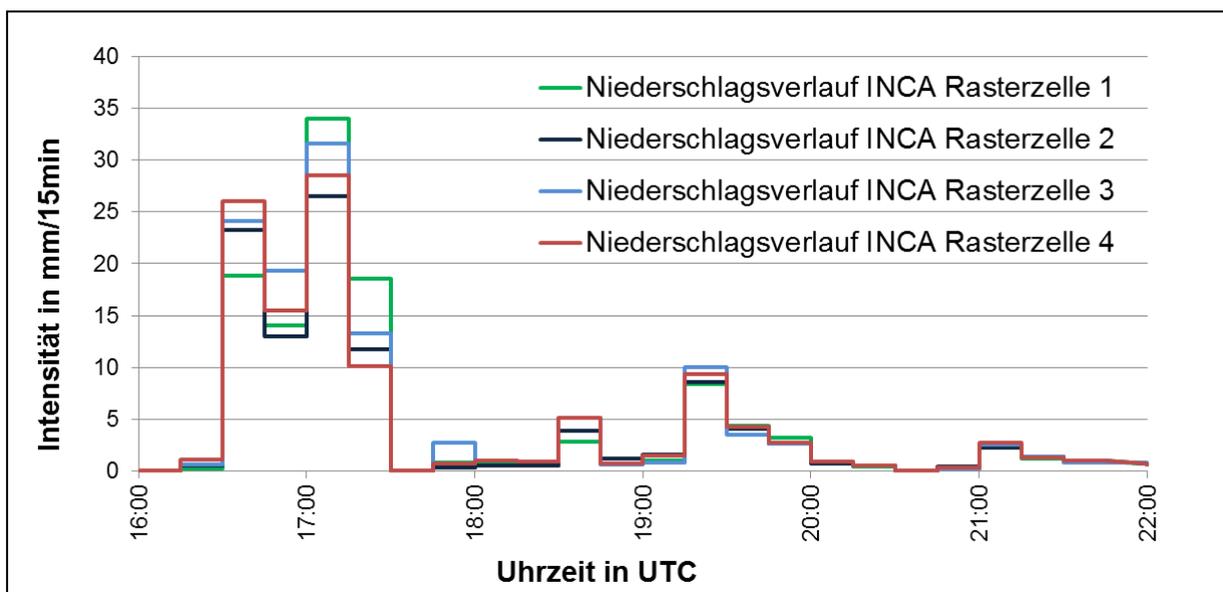


Abb. 4: Niederschlagsverlauf ausgewählter INCA Rasterzellen für Ereignis vom 08.06.2015

## 5. Ergebnisse

Die Berechnungsdauer für das Netz mit 1,57 Millionen Knoten und 1,91 Millionen Elementen betrug ca. 11,5 Stunden. Eine erste Verifikation der Simulation für das Niederschlagsereignis vom 08.06.2015 erfolgte auf Grundlage von dokumentierten Wasserständen. Eine zeitlich detaillierte und flächig lückenlose Kalibrierung war aufgrund des vorhandenen Datenmaterials nicht möglich. In den meisten Fällen konnte nur der maximale Wasserstand ohne zeitlichen Verlauf im Zuge von Feldbegehungen eruiert werden.

Für die Szenarienanalyse wurde als Vergleichsparameter der maximale Wasserstand herangezogen. In den Abbildungen 5 bis 6 sind jeweils Simulationsergebnisse für die am 08.06.2015 aufgetretene Regenverteilung (links) und modifizierte Variante (rechts) gegenübergestellt.

In der ersten Szenarienanalyse wurde das Zentrum des Niederschlagsereignisses um 4000m nach Westen und 500m Richtung Süden von Wallern an der Trattnach nach Bad Schallerbach verschoben. Vergleicht man die Wasserstände im südwestlichen Bereich des modellierten Einzugsgebietes so konnten, wie aufgrund der räumlichen Niederschlagsverteilung zu erwarten, extreme Unterschiede festgestellt werden. Die Wasserstände an den grün markierten Gebäuden (Abbildung 5) variieren dabei von 0m (Niederschlagsereignis 08.06.2015) bis 1m (Niederschlagsszenario 1). Auch stellt sich ein deutlicher Unterschied bezogen auf die räumliche Ausdehnung der Überschwemmungsfläche ein.

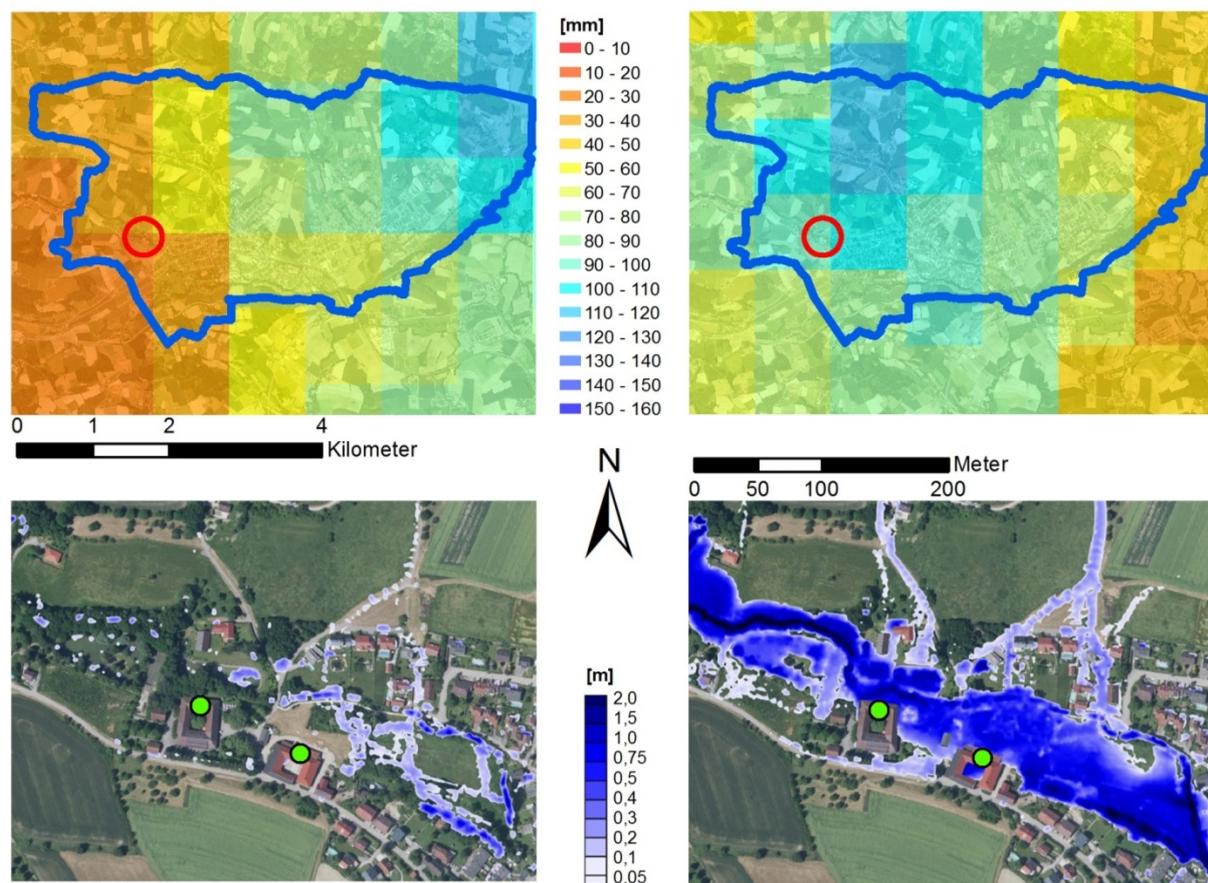


Abb. 5: Vergleich Ereignis 08.06.2015 (links) mit Niederschlagsszenario 1 (rechts)

Für die zweite Szenarienanalyse wurde das Zentrum der Gewitterzelle um 2500m nach Westen und 500m nach Süden verschoben. Vergleicht man die Ergebnisse, so konnte auch bei deutlich geringerer Verschiebung des Niederschlagsfeldes ein relevanter Unterschied bezogen auf den maximalen Wasserstand festgestellt werden. Der Wasserstand variiert dabei zwischen 0,85m (Niederschlagsereignis 08.06.2105) und 0,6m (Niederschlagsszenario 2) am grün markierten Gebäude (Abbildung 6). Zusätzlich ist ein geringer Unterschied bezogen auf die Ausdehnung der Überschwemmungsfläche ersichtlich.

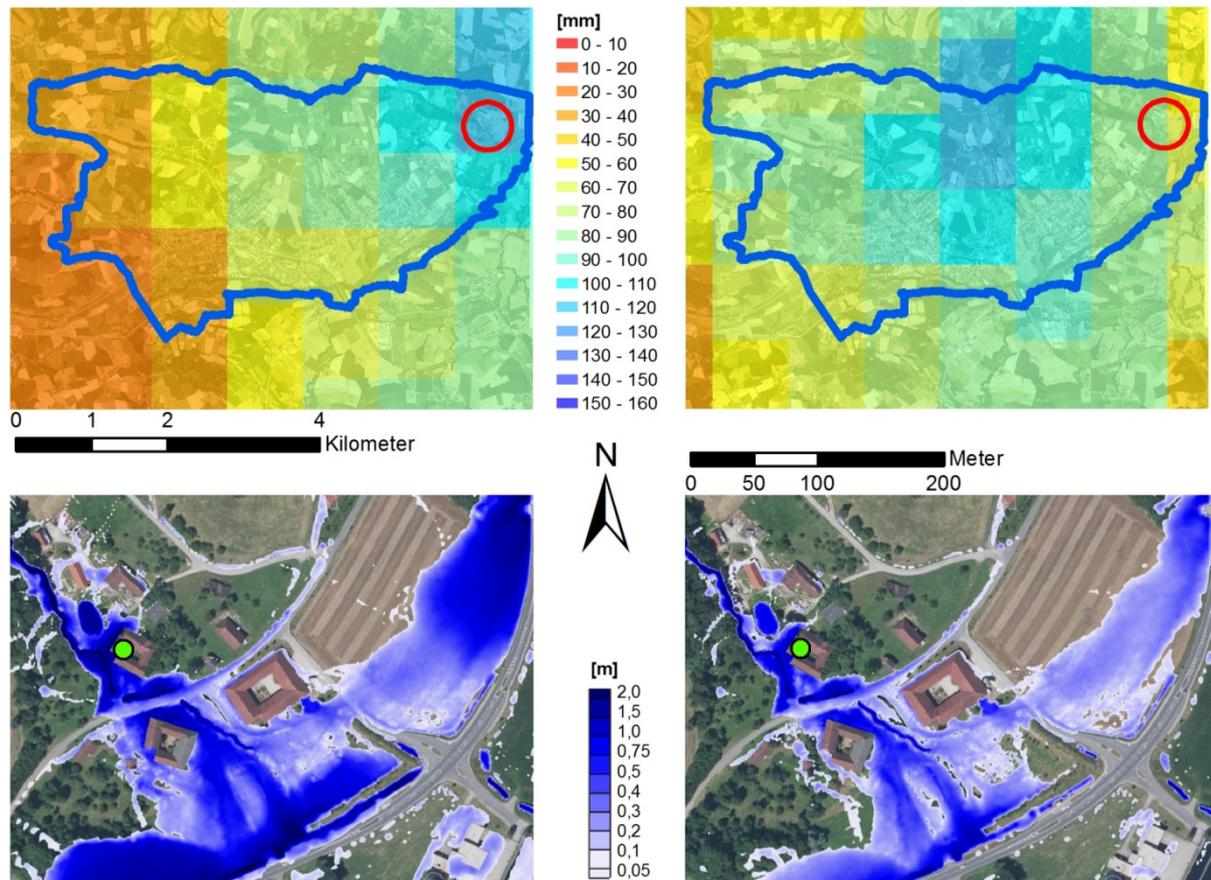


Abb.6: Vergleich Ereignis 08.06.2015 (links) mit Niederschlagsszenario 2 (rechts)

## 6. Ausblick

Die Auswertung der Niederschlagsszenarien zeigen eine für die Sturzflutsimulation relevante Korrelation zwischen Wasserstand und Niederschlagsverteilung, auch bei geringfügiger Verschiebung des realen Niederschlagsfeldes. Durch Verwendung des INCA Datensatzes ergibt sich die Möglichkeit, beobachtete Niederschlagsereignisse räumlich darzustellen und diese auch systematisch zu variieren. Aus der Simulation ist eine punktgenaue Auswertung auch szenarienbasiert möglich. Für die Betroffenheit einzelner Gebietsteile kann zusätzlich eine statistische Aussage abgeleitet werden. Unter- und Überschätzungen durch die Nutzung einer räumlich homogenen Niederschlagsverteilung werden vermieden.

## Danksagung

Dieses Projekt wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „Austrian Climate Research Programme – ACRP“ durchgeführt.

Die Landnutzungskarten, Orthofotos und das Digitale Geländemodell stellte die GIS-Abteilung des Landes Oberösterreich zur Verfügung.

## Literatur

- FORMAYER, H., and A. FRITZ, (2015): Temperature dependency of hourly precipitation intensities - surface versus cloud layer temperature. *Int. Jour. Clim.* (submitted).
- Haiden, T., A. KANN, G. PISTOTNIK, K. STADLBACHER, AND C. WITTMANN (2009): Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) - , System description. ZAMG report, 60p., [http://www.zamg.ac.at/fix/INCA\\_system.pdf](http://www.zamg.ac.at/fix/INCA_system.pdf)
- JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O. B., BOUWER, L., BRAUN, A., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GEORGIEVSKI, G., ET AL. (2013): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research *Regional Environmental Change*, Springer Berlin Heidelberg, , 1-16
- KLAR, R., ACHLEITNER, S., LUMASSEGGER, S., AUFLEGER, M., HOFER, M. (2014): Extension and testing of a 2D hydrodynamic model for direct rainfall runoff simulation. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2014)*. New York: City University of New York, ISBN 978-0-692-28129-1, online.
- KOHL, B. (2009): ZEMOKOST - das neue Hydrologie-Programm des BFW. Newsletter des Instituts für Naturgefahren und Waldgrenzregionen des BFW, Innsbruck: <http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=8213.10.12.09>
- LENDERINK, G., and E. van MEIJGAARD (2010): Linking increases in hourly precipitation extremes to atmospheric temperature and moisture changes. *Environmental Research Letters* 5(2): 025208.
- MUNICH RE (2015): Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft, 2000-2015. (Online). <https://www.munichre.com/touch/naturalhazards/de/naturalhazards/hydrological-hazards/index.html>. (Zugriff am 05 10 2015).
- MUSCHINSKI, T., AND J.I. KATZ (2013): Trends in hourly rainfall statistics in the United States under a warming climate. *Nature Clim. Change*, advance online publication.
- PREIN, A. F., W. LANGHANS, G. FOSSER, A. FERRONE, N. BAN, K. GOERGEN, M. KELLER, M. TÖLLE, O. GUTJAHR, F. FESER, ET AL. (2015): A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges, *Rev. Geophys.*, 53, 323–361. doi:10.1002/2014RG000475.
- SHOWALTER, A.K., (1947): A stability index for forecasting thunderstorms. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 34: 250– 252.
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA 1985): National engineering handbook, Section 4 - Hydrology. Washington DC.



## Verzeichnis der Autoren

**Achleitner**, Stefan, Assoz.-Prof. Dr., Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur Arbeitsbereich Wasserbau, Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck, Österreich, E-Mail: stefan.achleitner@uibk.ac.at

**Antonetti**, Manuel, M. Sc., Gebirgshydrologie und Massenbewegungen, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail: manuel.antonetti@wsl.ch

**Breuer**, Roman, Dipl.-Inform., RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Ingenieurhydrologie, Mies-van-der-Rohe-Str. 17, 52074 Aachen

**Buchholz**, Oliver, Dr., Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Bachstraße 62-64, 52066 Aachen, Tel.: 02471 / 94689-0, E-Mail: o.buchholz@hydrotec.de

**Cartus**, Svetlana, Dipl.-Ing., Erftverband, Bereich Gewässer, Abteilung Flussgebietsbewirtschaftung, 50126 Bergheim, E-Mail: Svetlana.Cartus@erftverband.de

**Casper**, Markus, Prof. Dr.-Ing., Universität Trier – FB VI Physische Geographie, Behringstraße, 54286 Trier, E-Mail: casper@uni-trier.de

**Demuth**, Norbert, Dipl.-Geogr., Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, Kaiser-Friedrich-Straße 7, 55116 Mainz, Tel.: 06131 / 60331710, E-Mail: norbert.demuth@luwg.rlp.de

**Dorp**, Manfred, MSc., Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Bachstraße 62-64, 52066 Aachen, Tel.: 02471 / 94689-0, E-Mail: m.dorp@hydrotec.de

**Einfalt**, Thomas, Dr., hydro & meteo GmbH & Co. KG, Breite Str. 6-8, D-23552 Lübeck, Deutschland, E-Mail: einfalt@hydrometeo.de

**Formayer**, Herbert, Dr., Universität für Bodenkultur, Institut für Meteorologie, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien, Österreich, E-Mail: herbert.formayer@boku.ac.at

**Gattke**, Christian, Dr.-Ing., Erftverband, Bereich Gewässer, Abteilung Flussgebietsbewirtschaftung, 50126 Bergheim, E-Mail: Christian.gattke@erftverband.de

**Gronz**, Oliver, Dr., Universität Trier, Fachbereich 6, Physische Geographie, 54286 Trier, E-Mail: gronz@uni-trier.de

**Haag**, Ingo, Dr.-Ing., HYDRON GmbH, Haid-und-Neu-Str. 7, 76131 Karlsruhe, E-Mail: ingo.haag@hydron-gmbh.de

**Hellebrand**, Hugo, Dr., Universität Trier, Fachbereich 6, Physische Geographie, 54286 Trier, E-Mail: hellebra@uni-trier.de

**Hellmers**, Sandra, MSc., Institute of River and Coastal Engineering, TU Hamburg-Harburg, 21073 Hamburg, E-Mail: s.hellmers@tuhh.de

**Henn**, Nicole, Dipl.-Geogr., HYDRON GmbH, Haid-und-Neu-Str. 7, 76131 Karlsruhe, E-Mail: nicole.henn@hydron-gmbh.de

**Keller**, Tilo, Dr., Erftverband, Bereich Gewässer, Abteilung Flussgebietsbewirtschaftung, 50126 Bergheim

**Kienzler**, Peter, Dr., Scherrer AG - Hydrologie und Hochwasserschutz, Schönmatstr. 8, CH-4153 Reinach, E-Mail: kienzler@scherrer-hydrol.ch

**Klebinder**, Klaus, Mag., Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft - BFW, Hofburg Rennweg 1, A-6020 Innsbruck

**Kohl**, Bernhard, Dr., Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft - BFW, Hofburg Rennweg 1, A-6020 Innsbruck, E-Mail: bernhard.kohl@bfw.ac.at

**Ley**, Rita, Dr., Universität Trier, Fachbereich 6, Physische Geographie, 54286 Trier, E-Mail: leyrita@uni-trier.de

**Luce**, Annette Dipl.-Ing. (FH), HYDRON GmbH, Haid-und-Neu-Str. 7, 76131 Karlsruhe, annette.luce@hydron-gmbh.de

**Lumassegger**, Simon, Dipl.-Ing., Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur Arbeitsbereich Wasserbau, Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck, Österreich, simon.lumassegger@uibk.ac.at

**Margreth**, Michael, Dipl.-Geogr., SoilCom GmbH, Probusweg 22, CH-8057 Zürich, E-Mail: michael.margreth@soilcom.ch

**Markart**, Gerhard, Dr., Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft - BFW, Hofburg Rennweg 1, A-6020 Innsbruck

**Meißl**, Gertraud, Dr., Institut für Geographie, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck

**Nacken**, Heribert, Prof. Dr.-Ing., Lehr- und Forschungsgebiet Ingenieurhydrologie, Mies-van-der-Rohe-Str. 17 52074 Aachen

**Pyka**, Christiane E., M.Sc., RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Ingenieurhydrologie, Mies-van-der-Rohe-Str. 17, 52074 Aachen, pyka@ifi.rwth-aachen.de

**Raugewitz**, Kyra Nele, M.Sc., Universität Trier, Fachbereich 6, Bodenkunde, 54286 Trier

**Schardong**, Aaron, M.Sc., Universität Trier, Fachbereich 6, Bodenkunde, 54286 Trier

**Scherrer**, Simon, Dr., Scherrer AG - Hydrologie und Hochwasserschutz, Schönmatstr. 8, CH-4153 Reinach, E-Mail: scherrer@scherrer-hydrol.ch

**Schneider**, Raimund, Dr., Universität Trier, Fachbereich 6, Bodenkunde, 54286 Trier, E-Mail: schneider@uni-trier.de

**Schwab**, Christian, Universität Trier, Verwaltung, Abteilung 4, Elektroniklabor, 54286 Trier, E-Mail: schwabch@uni-trier.de

**Sotier**, Bernadette, Dipl.-Geogr., Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft - BFW, Hofburg Rennweg 1, A-6020 Innsbruck

**Stahl**, Natalie, Dipl.-Umweltwiss., Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, Rosenkavalierplatz 2, 81925 München, E-Mail: Natalie.Stahl@stmuv.bayern.de

**Strehz**, Alexander, Dipl.-Met., hydro & meteo GmbH & Co. KG, Breite Str. 6-8, D-23552 Lübeck, Deutschland, a.strehz@hydrometeo.de

**Thiele-Bruhn**, Sören, Prof. Dr. agr., Universität Trier, Fachbereich 6, Bodenkunde, 54286 Trier, E-Mail: thiele@uni-trier.de

**Werner**, Horst, Dipl.-Ing., Erftverband, Bereich Gewässer, Abteilung Flussgebietsbewirtschaftung, 50126 Bergheim

**Zappa**, Massimiliano, Dr., Gebirgshydrologie und Massenbewegungen, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail: massimiliano.zappa@wsl.ch

**Zemke**, Julian J., Dr., Universität Koblenz-Landau, Institut für Integrierte Naturwissenschaften, Abteilung Geographie, Universitätsstr. 1, D-56070 Koblenz, zemke@uni-koblenz.de



## Schriftenreihe Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

### Bisher erschienene Hefte

- Heft 01.02 Wechselwirkungen zwischen Grundwasserleitern und Oberflächengewässern  
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2002 am 20./21. März 2002 in Suderburg  
Herausgeber: Hartmut Wittenberg und Matthias Schöniger  
210 Seiten, 63 Abbildungen, Format A4  
ISBN: 3-936514-22-4 vergriffen
- Heft 02.02 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung  
Beiträge zum Seminar am 7./8. November 2002 in Koblenz  
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon  
201 Seiten, 43 Abbildungen, Format A4  
ISBN 3-936514-26-7 vergriffen  
Aktualisierte Neuauflage erschienen als Heft 02.03  
Beiträge zum Seminar am 12./13. Juni 2003 in Weimar  
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon  
200 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4  
ISBN 3-924063-58-3 vergriffen
- Heft 03.03 Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer  
Beiträge zum Seminar am 12./13. Mai 2003 in Stein bei Nürnberg  
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg  
185 Seiten, 32 Abbildungen, Format A4  
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen  
Aktualisierte Neuauflage erscheinen als Heft 03.05  
Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund  
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg  
185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4  
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen
- Heft 04.03 Klima – Wasser – Flussgebietsmanagement – im Lichte der Flut  
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2003 am 20./21. März 2003 in Freiburg i.Br.  
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg  
Band1 Vorträge, 270 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4  
Band 2 Poster, 194 Seiten 105 Abbildungen, Format A4  
ISBN 3-924063-59-1 vergriffen
- Heft 05.04 Wasser- und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten  
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2004 am 22./23. März 2004 in Potsdam  
Herausgeber: Axel Bronstert, Annegret Thieken, Bruno Merz,  
Michael Rode, Lucas Menzel  
Band1 Vorträge, 221 Seiten, 88 Abbildungen, Format A4  
Band 2 Poster, 315 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4  
ISBN 3-937758-18-6 beide Bände zusammen 45 EUR
- Heft 06.04 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung  
Neuauflage  
Beiträge zum Seminar am 17./18. Juni 2004 in Münster  
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon  
172 Seiten, 61 Abbildungen, Format A4  
ISBN 3-937758-19-4 vergriffen

Heft 07.04	<p>Niedrigwassermanagement          Beiträge zum Seminar am 11./12. November 2004 in Koblenz          Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Gero Koehler          172 Seiten, 82 Abbildungen, Format A4          ISBN 3-937758-47-X</p>	vergriffen
Heft 08.05	<p>Hochwasser-Gefahrenkarten          Teil 1: Erarbeitung und Nutzung von Hochwassergefahrenkarten          Beiträge zum Erfahrungsaustausch am 24. November 2004 in Erfurt          Teil 2: Zonierungssystem und Risikomodellierung in der Versicherungswirtschaft          Herausgeber: Hans-B. Kleeberg          140 Seiten, 34 Abbildungen, Format A4          ISBN 3-937758-48-8</p>	vergriffen
Heft 03.05	<p>Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer          Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund          Aktualisierte Neuauflage von Heft 03.03          Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg          185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4          ISBN 3-924063-57-5</p>	vergriffen
Heft 09.05	<p>Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen          Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz          Herausgeber: Hans-B. Kleeberg          159 Seiten, 44 Abbildungen, Format A4          ISBN 3-937758-67-4</p>	vergriffen
Heft 10.05	<p>Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft –          von der Theorie zum Anwendungsfall          Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005 am 22./23. März 2005 in Aachen          Herausgeber: Heribert Nacken, Sabine Bartussek, Hani Sewilam          314 Seiten, 131 Abbildungen, 25 Tabellen, Format A4          ISBN 3-937758-68-2</p>	42 EUR, CD 29 EUR
Heft 11.05	<p>Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzepte          Beiträge zum Seminar am 2./3. Juni 2005 in Braunschweig          Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon          200 Seiten, 75 Abbildungen, Format A4          ISBN 3-937758-80-1</p>	38 EUR, CD 29 EUR
Heft 12.05	<p>Akustische Doppler Geräte (ADCPs) in der Hydrometrie:          Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik          Beiträge zum Seminar am 28./29. September 2005 in Koblenz          Herausgeber: Matthias Adler und Hans-B. Kleeberg          172 Seiten, 120 Abbildungen, 8 Tabellen, Format A4          ISBN 3-937758-90-9</p>	38 EUR, CD 29 EUR
Heft 13.05	<p>Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele          Herausgeber: Axel Bronstert          Monographie, 2005          148 Seiten, 81 Abbildungen, 12 Tabellen, Format A4          ISBN 3-937758-91-7</p>	38 EUR, CD 29 EUR

- Heft 14.06 Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen  
Aktualisierte Neuauflage  
Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz  
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg  
205 Seiten, Format A4  
ISBN-10: 3-939057-30-4  
ISBN-13: 978-3-939057-30-7 38 EUR, CD 29 EUR
- Heft 15.06 Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse  
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2006 am 22./23. März 2006  
an der Universität der Bundeswehr München  
Herausgeber: Markus Disse, Karin Guckenberger, Sabine Pakosch,  
Alpaslan Yörük, Astrid Zimmermann  
Band 1 Vorträge 1, 278 Seiten  
Band 2 Vorträge 2, 338 Seiten beide Vortragsbände zusammen 50 EUR  
Band 3 Poster, 280 Seiten Posterband zusätzlich/alleine 15 EUR  
ISBN-10: 3 939057-31-2  
ISBN-13: 978-3-939057-31-4
- Heft 16.06 Niederschlag-Abfluss-Modellierung  
Beiträge zum Workshop am 10./11. April 2006 in Trier  
Herausgeber: Markus Casper und Marcus Herbst  
195 Seiten, Format A4  
ISBN-10: 3-939057-55-X  
ISBN-13: 978-3-939057-55-0 45 EUR, CD 29 EUR
- Heft 17.06 Dezentraler Hochwasserschutz  
Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz  
Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg  
188 Seiten, Format A4  
ISBN-10: 3-939057-56-8  
ISBN-13: 978-3-939057-56-7 45 EUR, CD 29 EUR
- Heft 18.06 Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzepte  
Beiträge zum Seminar am 6./7. November 2006 in Stein bei Nürnberg  
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg, Heribert Nacken  
232 Seiten, Format A4  
ISBN-10: 3-939057-57-6  
ISBN-13: 978-3-939057-57-4 45 EUR, CD 29 EUR
- Heft 19.07 Dezentraler Hochwasserschutz  
Beiträge zum Seminar am 4./5. Juni 2007 in Leipzig  
Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg  
196 Seiten, Format A4  
ISBN-13: 978-3-940173-03-4 48 EUR, CD 29 EUR

Heft 20.07	<p>Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern          Beiträge zum Tag der Hydrologie 2007 am 22./23. März 2007          an der Universität Rostock          Herausgeber: Konrad Miegel, Ellen-Rose Trübger, Hans-B. Kleeberg          Band 1 Vorträge, 276 Seiten          Band 2 Poster, 17 Seiten          ISBN: 978-3-940173-04-1</p>	<p>beide Bände zusammen 60 EUR, , CD 29 EUR</p>
Heft 21.07	<p>Verdunstung          Beiträge zum Seminar am 10./11. Oktober 2007 in Potsdam          Herausgeber: Konrad Miegel, Hans-B. Kleeberg          252 Seiten, Format A4          ISBN: 978-3-940173-05-8</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 22.07	<p>EU-Hochwasserrichtlinie          Wohin geht die Reise beim Europäischen Hochwasserschutz          Beiträge zum Seminar am 19./10. November 2007 in Koblenz          Herausgeber: Heribert Nacken          126 Seiten, Format A4          ISBN: 978-3-940173-44-7</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 23.08	<p>Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung          – Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden          Beiträge zum Tag der Hydrologie 2008 am 27./28. März 2008          an der Leibniz Universität Hannover          Herausgeber: Uwe Haberlandt, Bernd Riemeier,          Max Billib, Hans-Reinhard Verworn, Hans-B. Kleeberg          300 Seiten, Format A4, mit Poster-CD          ISBN: 978-3-940173-96-6</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 24.08	<p>Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun?          Beiträge zum Symposium am 24./25 Juni 2008 in Nürnberg          Herausgeber: Hans-B. Kleeberg          256 Seiten, Format A4          ISBN: 978-3-940173-97-3</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 25.09	<p>EU-Hochwasserrichtlinie          In drei Schritten zur Umsetzung          Beiträge zum Seminar am 19. Februar 2009 in Magdeburg          Herausgeber: Heribert Nacken          126 Seiten, Format A4          ISBN: 978-3-941089-53-2</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>
Heft 26.09	<p>Hydrologische Systeme im Wandel          Beiträge zum Tag der Hydrologie 2009 am 26./27. März 2009          an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel          Herausgeber: Nicola Fohrer, Britta Schmalz,          Georg Hörmann, Katrin Bieger          196 Seiten, Format A4          ISBN: 978-3-941089-54-9</p>	<p>48 EUR, CD 29 EUR</p>

- Heft 27.10 Auen und Hochwasser  
Beiträge zum Internationalen Symposium am 10./11. Februar 2010  
in Ingolstadt  
Herausgeber: Bernd Cyffka, Hans-B. Kleeberg  
226 Seiten, Format A4  
ISBN: 978-3-941897-08-3 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 28.10 Abflüsse aus extremen Niederschlägen  
Beiträge zum 2. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung  
am 14./15. September 2009 in Trier  
Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz  
245 Seiten, Format A4  
ISBN: 978-3-941897-22-9 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 29.10 Nachhaltige Wasserwirtschaft durch Integration von  
Hydrologie, Hydraulik, Gewässerschutz und Ökonomie  
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2010 am 25./26. März 2010  
an der Technischen Universität Braunschweig  
Herausgeber: Günter Meon  
283Seiten, Format A4, mit Poster-CD  
ISBN: 978-3-941897-49-6 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 30.11 Hydrologie & Wasserwirtschaft - von der Theorie zur Praxis  
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2011 am 24./25. März 2011  
an der Technischen Universität Wien  
Herausgeber: Günter Blöschl, Ralf Merz  
394 Seiten, Format A4  
ISBN: 978-3-941897-79-3 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 31.12 Wasser ohne Grenzen  
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2012 am 22./23. März 2012  
an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Herausgeber: Markus Weiler  
413 Seiten, Format A4, mit Poster-CD  
ISBN: 978-3-942964-38-8 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 32.13 Wasserressourcen im globalen Wandel : Hydrologische Grundlagen -  
von der Messung zur Anwendung  
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2013 am 4.-6. April 2013  
an der Universität Bern  
Herausgeber: Rolf Weingartner, Bruno Schädler  
199 Seiten, Format A4  
ISBN: 978-3-942964-89-0 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 33.13 Simulation hydrologischer Systeme – Wie nah kommen wir der Realität?  
Beiträge zum 3. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung am 17./18.  
September 2012 in Trier  
Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz  
212 Seiten, Format A4  
ISBN: 978-3-944328-02-7 50 EUR, CD 29 EUR

- Heft 34.14 Wasser - Landschaft - Mensch in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft  
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 20./21. März 2014 an der Katholischen Universität  
Eichstätt-Ingolstadt  
Herausgeber: Bernd Cyffka  
274 Seiten, Format A4  
ISBN: 978-3-944328-61-4 50 EUR, CD 29 EUR
- Heft 35.15 Aktuelle Herausforderungen im Flussgebiets- und Hochwassermanagement  
Prozesse | Methoden | Konzepte  
Beiträge zum Tag der Hydrologie am 19./20. März 2015 an der Universität Bonn  
Herausgeber: Mariele Evers, Bernd Diekkrüger  
389 Seiten, Format A4  
ISBN: 978-3-88721-229-2  
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.35.15
- Heft 36.16 Räumliche Heterogenität - Erkennen, Abbilden, Validieren oder Ignorieren?  
Beiträge zum 4. Trierer Workshop zur Niederschlag-Abfluss-Modellierung am 5. und 6. Oktober  
2015 in Trier  
Herausgeber: Markus Casper, Oliver Gronz  
144 Seiten, Format A4  
ISBN: 978-3-88721-306-0  
DOI: 10.14617/for.hydrol.wasbew.36.16

Mitglieder der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften erhalten auf den Preis einen Nachlass von 20 %

Ab 2015 erschienene Hefte sind unter <http://www.fghw.de> verfügbar.