

Ingo Haag, Julia Krumm, Dirk Aigner, Andreas Steinbrich & Markus Weiler

Simulation von Hochwasserereignissen in Folge lokaler Starkregen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM

Simulation of floods caused by intense rain events with the water balance model LARSIM

Das in der Hochwasservorhersage und -frühwarnung bislang bereits erfolgreich eingesetzte Wasserhaushaltsmodell LARSIM wurde mit dem Infiltrationsmodul des Modells RoGeR ergänzt, um Infiltrationsüberschuss bei Starkregen und daraus resultierende (lokale) Hochwasser realistischer abbilden zu können. Mit dem dynamischen Ansatz wird die Infiltration über die Bodenmatrix, über Makroporen und über Trockenrisse mithilfe der physikalisch basierten Green-Ampt-Approximation räumlich sehr hoch aufgelöst simuliert. Die großräumige und zugleich flächendifferenzierte Parametrisierung des Infiltrationsmoduls kann auf der Basis mittelmaßstäblicher Bodenkarten und der Landnutzung analog zum Vorgehen in RoGeR erfolgen. Zunächst wurde eine entsprechende Parametrisierungsstrategie für die gesamte Landesfläche von Baden-Württemberg abgeleitet und umgesetzt. Diese wurde dann auf Gebiete mit anderen Datengrundlagen übertragen. Das Infiltrationsmodul, die Parametrisierungsstrategie und deren Übertragbarkeit wurden anhand von sieben Starkregenereignissen in fünf mesoskaligen Einzugsgebieten in Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und Luxemburg validiert. Im Vergleich zur bisherigen Modellkonfiguration führte die Berücksichtigung des Infiltrationsmoduls für alle sieben Starkregenereignisse zu klaren Verbesserungen bei der Simulation der Abflussreaktion. Bei ausreichender Qualität des Niederschlagsinputs konnten die zumeist durch Horton-Oberflächenabfluss dominierten Ereignisse mit den LARSIM-Modellen hinsichtlich Volumen und Scheitel gut nachgebildet werden. Dies belegt die grundsätzliche Eignung des Infiltrationsmoduls und deutet darauf hin, dass die robuste Parametrisierungsstrategie auf Gebiete mit unterschiedlichen Datengrundlagen übertragen werden kann. Mit den erfolgreichen Weiterentwicklungen wurde somit eine wichtige Grundlage für die Vorhersage lokaler Hochwasser in Folge von kleinräumigem Starkregen geschaffen. Die Analysen verdeutlichen aber auch, dass Unsicherheiten im Radarniederschlag üblicher Weise zu Über- oder Unterschätzungen des resultierenden Abflusses um den Faktor zwei führen können. Zudem ist es wünschenswert, LARSIM so weiterzuentwickeln, dass das gleichzeitige Auftreten von Horton-Oberflächenabfluss und sättigungsbedingten Abflussreaktionen zukünftig besser abgebildet werden kann. Ein Augenmerk zukünftiger Arbeiten sollte daher sowohl auf der Weiterentwicklung von LARSIM wie auch auf der weiteren Verbesserung von Radar-Produkten und Niederschlagsvorhersagen liegen.

Schlagwörter: Starkregen, pluviale Hochwasser, fluviale Hochwasser, Horton-Oberflächenabfluss, LARSIM, Wasserhaushaltsmodell

The distributed water balance model LARSIM has been successfully used for real-time forecasting of fluvial floods for two decades. In order to improve the simulation of infiltration excess, Horton Overland Flow (HOF) and (local) pluvial floods due to intense rainfall, LARSIM was amended by the infiltration module of the research model RoGeR. The newly introduced infiltration module accounts for matrix infiltration as well as infiltration via macropores and shrinkage cracks by applying the physically based Green-Ampt approximation. First, we derived an approach to parameterize the infiltration module with a high spatial resolution on the basis of a digital soil map and land use data for the federal state of Baden-Württemberg. Secondly, this approach was transferred to regions in North-Rhine Westphalia and Luxembourg using different soil data. The infiltration module and the parametrization approaches were evaluated using seven intense rain events in five different mesoscale catchments in Baden-Württemberg, North-Rhine Westphalia and Luxembourg. Introducing the infiltration module improved simulation results for all seven mainly HOF dominated events. When using sufficiently accurate rain input, the measured discharges of the events (volume and peak) could generally be reproduced well with the model. These findings suggest that the infiltration module as well as the parametrization approach are broadly valid, transferable and robust. The successful model improvement lays an important foundation for a possible future real-time forecasting of pluvial floods. However, our investigations also showed that the uncertainty of radar based rain may typically cause under- or overestimations of the resulting discharge by a factor of up to two. Moreover, LARSIM should be further improved with respect to simulating the simultaneous occurrence of HOF and saturation driven runoff. Consequently, besides further refining LARSIM, the quantitative estimation and forecasting of precipitation with weather radar also needs to be further improved in order to enhance the simulation and prediction of floods caused by intense rain events.

Keywords: Intense rainfall, pluvial flood, fluvial flood, Horton Overland Flow, LARSIM, water balance model

1 Einleitung

Das Wasserhaushaltsmodell (WHM) LARSIM dient unter anderem als Werkzeug zur Analyse und Vorhersage von Hochwasser. In mehreren deutschen Bundesländern sowie in mehreren Behörden in Frankreich, Luxemburg, der Schweiz und Österreich wird LARSIM standardmäßig seit vielen Jahren erfolgreich zur operationellen Hochwasservorhersage und -frühwarnung eingesetzt (BREMICKER, 2000; BREMICKER et al., 2006; 2011; 2013; GERLINGER & DEMUTH, 2001; LUCE et al., 2006; VOGELBACHER, 2006; BRAHMER, 2010; BARTELS et al., 2017; HAAG et al., 2019a). Das Modell wird im Auftrag der LARSIM-Entwicklergemeinschaft (LEG) kontinuierlich im Hinblick auf diesen Einsatz weiterentwickelt. In der Vergangenheit wurde das Modell dabei vor allem zur Simulation von Flusshochwasser (fluvial floods) angewendet und entwickelt. Diese Hochwasser werden in der Regel durch großflächige, langanhaltende Niederschläge ausgelöst, welche zu einer Aufsättigung der Böden in den Einzugsgebieten führen. Prozesse, welche zur Entstehung solcher Flusshochwasser führen, sind folglich im WHM LARSIM mit ausreichendem Detailgrad berücksichtigt (LEG, 2020).

In den letzten Jahren kam es in Deutschland zu einer Häufung von Überschwemmungen in Folge von kleinräumigen, konvektiven Niederschlagsereignissen, die erhebliche Schäden verursachten (BBK, 2015). Wengleich die bisher beobachtete Entwicklung kurzer, sommerlicher Starkregen in Deutschland noch keine eindeutigen Schlüsse hinsichtlich einer möglichen Verschärfung zulässt, wird davon ausgegangen, dass solche Ereignisse vor dem Hintergrund des Klimawandels und der damit verbundenen Temperaturzunahme zukünftig noch häufiger und intensiver werden könnten (DWD, 2016). Überschwemmungen oder Hochwasser in Folge von kleinräumigen Starkregen (pluvial floods) zeichnen sich u. a. durch eine kurze Entstehungszeit aus und können auch entlang der Bachläufe in kleinen Einzugsgebieten ein großes Schadenspotenzial haben. Dementsprechend besteht ein großes Interesse daran, solche Ereignisse auch in operationellen hydrologischen Modellen bestmöglich abzubilden, um zukünftig entsprechende Vorhersagen zu ermöglichen. Die für die Entstehung von Hochwassern in der Folge von Starkregen verantwortlichen hydrologischen Prozesse und die relevanten zeitlichen und räumlichen Skalen unterscheiden sich jedoch deutlich von denen eines Flusshochwassers (BORGA et al., 2011; HAPUARACHCHI et al., 2011). Vor diesem Hintergrund wurde das bislang vor allem für Flusshochwasser genutzte WHM LARSIM weiterentwickelt, um auch die Abflussreaktion auf Starkregen adäquat abzubilden (LUBW, 2019).

Im vorliegenden Artikel werden die modelltechnischen Grundlagen dieser Weiterentwicklung sowie die großräumige flächendifferenzierte Parametrisierungsstrategie für das neue Infiltrationsmodul in LARSIM erläutert. Anhand von sieben Starkregenereignissen in fünf Einzugsgebieten in Baden-Württemberg, Luxemburg und Nordrhein-Westfalen wird die Wirkung der Weiterentwicklung sowie die Übertragbarkeit der Parametrisierungsstrategie auf Gebiete mit unterschiedlichen Datengrundlagen überprüft. Da der Niederschlag großen Einfluss auf die Abflussreaktion bei Starkregen hat, wird zudem die mögliche Auswirkung der Unsicherheit der verwendeten Radarniederschläge bewertet.

2 Modelltheorie und Parametrisierung

2.1 Grundlegende Funktionsweise von LARSIM

Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) wurde von BREMICKER (2000) auf Basis des Flussgebietsmodells FGMOD (LUDWIG, 1982) entwickelt. In den letzten 20 Jahren wurde LARSIM mit dem Fokus auf den operationellen Vorhersagebetrieb im Auftrag der länderübergreifenden LARSIM-Entwicklergemeinschaft (LEG) kontinuierlich weiterentwickelt (BREMICKER et al., 2013). Die Funktionsweise des modular aufgebauten Modells ist in LEG (2020) detailliert beschrieben.

LARSIM ist ein prozessorientiertes, räumlich verteiltes Wasserhaushaltsmodell. Beim Aufbau eines LARSIM-Modells werden die Flussgebiete zunächst in Teilgebiete (TGB) unterteilt, die über die Fließvernetzung miteinander verknüpft sind. Die TGB können entweder als reale hydrologische Teil-Einzugsgebiete oder als Raster aufgebaut sein (Abb. 1). In den räumlich hoch aufgelösten operationellen Modellen der Bundesländer haben diese LARSIM-TGB häufig eine Größe von ca. 1 km² (BREMICKER et al., 2013). Die Berechnung von Abflusskonzentration und Wellenablauf im Gerinne erfolgt auf der räumlichen Ebene der TGB. Die Abflusskonzentration wird dabei in der Regel durch vier unterschiedlich schnell reagierende, parallele Einzellinearspeicher abgebildet, welche die Abflusskomponenten Basisabfluss, Interflow, langsamer Direktabfluss und schneller Direktabfluss repräsentieren (Abb. 2 und LEG, 2020). Der zeitliche Verlauf der Abflusskonzentration

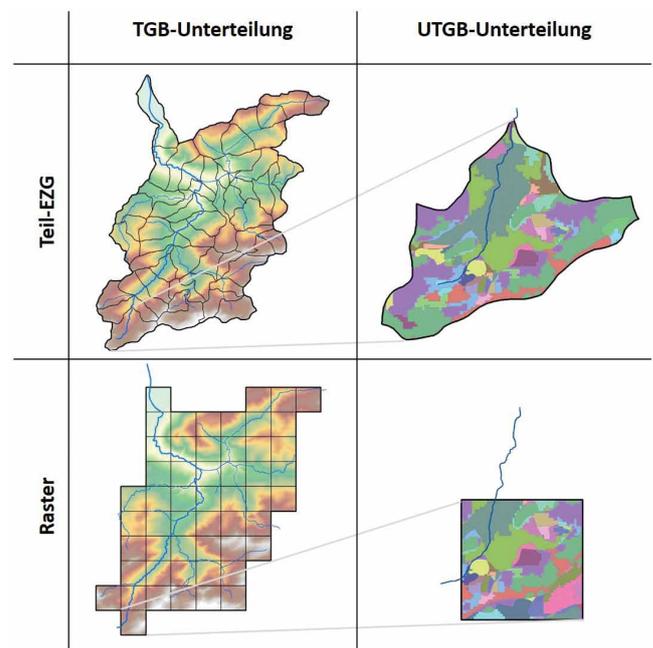


Abbildung 1

Grundlegende räumliche Struktur eines LARSIM-Modells mit TGB-Aufteilung in hydrologische Teil-Einzugsgebiete (Teil-EZG, links oben) bzw. Raster (links unten) sowie Unterteilung eines Teil-Einzugsgebiets (rechts oben) bzw. Raster (rechts unten) in UTGB, welche durch die unterschiedlichen Farben repräsentiert werden.

Spatial structure of LARSIM water balance model with discretization into hydrological sub-catchments (Teil-EZG, left top) or grid cells (Raster, left bottom) and discretization of a sub-catchment (right top) or grid cell (right bottom) into hydrological response units (HRU, UTGB), which are represented by the different colors.

zentration wird dabei durch Rückhaltekonstanten gesteuert, deren Werte durch Kalibrierung ermittelt werden müssen. Die Rückhaltekonstante für die Abflusskonzentration des bei Starkregen relevanten schnellen Direktabflusses wird über den Parameter EQD2 festgelegt bzw. kalibriert (Abb. 2; HAAG et al., 2016; LEG, 2020).

Jedes TGB wird wiederum in hydrologisch ähnlich reagierende Unter-Teilgebiete (UTGB) gegliedert, die auch als Hydrotrope oder Hydrological Response Units (HRU) bezeichnet werden. Diese in der Regel wenige Hektar großen UTGB sind durch eine einheitliche Landnutzung und vergleichbare Bodeneigenschaften definiert (Abb. 1).

Auf der räumlichen Ebene der UTGB werden die Schneedynamik, die Interzeption, die Evapotranspiration (i. d. R. nach Penman-Monteith) sowie der Bodenwasserhaushalt und die Abflussbildung simuliert. Die Simulation von Evapotranspiration, Bodenwasserhaushalt und Abflussbildung basiert dabei auf dem UTGB-spezifischen LARSIM-Bodenspeicher, der das effektive Porenvolumen [mm] repräsentiert. Das effektive Porenvolumen wird wiederum in die Luftkapazität (LK) und die nutzbare Feldkapazität (nFK) unterteilt. Die LK wird über vertikale Tiefenversickerung zum Basisabfluss und/oder laterale Drainage zum Interflow rasch entleert. Die nFK wird nicht bzw. nur sehr langsam über vertikale Tiefenversickerung zum Basisabfluss entleert und steht somit langfristig für die Evapotranspiration zur Verfügung. Mit einem optionalen UTGB-spezifischen vertikalen Durchlässigkeitsbeiwert (VDB) kann berücksichtigt werden, dass die Tiefenversickerung beim Vorliegen hydraulisch schlecht durchlässiger Bodenhorizonte reduziert wird. Für grundwasser-nahe UTGB kann optional zudem der kapillare Aufstieg (kapA) in den Bodenspeicher abgebildet werden (Abb. 2 und LEG, 2020).

In den operationellen LARSIM-Modellen wird die schnelle Abflussreaktion (Direktabfluss) i. d. R. mit dem nach TODINI (1996) modifizierten Xinanjiang-Verfahren (ZHAO, 1977) abgebildet, bei dem der Anteil des Direktabflusses am Wasserdargebot eine nichtlineare Funktion der aktuellen Füllung des Bodenspeichers ist (BEVEN, 2012). In LARSIM wird das Verfahren als Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion (BSF) oder Preferential Flow Function (PFF) bezeichnet. Der über die BSF ermittelte Direktabfluss wird mittels des Parameters A2 nochmals in den sogenannten langsamen Direktabfluss und den schnellen Direktabfluss aufgeteilt. Dabei ist A2 ein einfacher Schwellenwert in Form einer Rate [mm/h]. Solange die Rate des durch die BSF gebildeten gesamten Direktabflusses kleiner als A2 ist, wird der gesamte Direktabfluss als langsamer Direktabfluss abgeführt. Übersteigt die aktuelle Rate des gesamten Direktabflusses den Schwellenwert A2, so wird der Anteil, der über A2 hinausgeht, als schneller Direktabfluss abgeführt (Abb. 2 und LEG, 2020). Direktabfluss wird in LARSIM somit bislang mit einem konzeptionellen Ansatz ermittelt, welcher vorrangig von der Bodenfeuchte abhängig ist. Vor allem die Quantifizierung des schnellen Direktabflusses erfolgt dabei über einen sehr einfachen Schwellenwertansatz, bei dem A2 durch Kalibrierung ermittelt werden muss.

2.2 Implementierung des Infiltrationsmoduls

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Modellstruktur wurde in den letzten 20 Jahren erfolgreich für die Simulation und Vorhersage von Flusshochwassern in der Folge von ergiebigen Niederschlags- und/oder Schneeschmelzereignissen eingesetzt (BREMICKER, 2000; BREMICKER et al., 2006; 2011; 2013; GERLINGER & DEMUTH, 2001; LUCE et al., 2006; VOGELBACHER, 2006; BRAHMER, 2010; BARTELS et al., 2017; HAAG et al., 2019a). Der Fokus der Anwendung lag bisher jedoch nicht auf lokalen Hochwassern durch kleinräumige Starkregen. Nach den verheerenden Überschwemmungen in Folge von Starkregen in den letzten Jahren wurde das Modell daher weiterentwickelt, um auch diese (lokalen) Hochwasser, die primär aus Infiltrationsüberschuss bzw. Horton-Oberflächenabfluss (HOF) resultieren, bestmöglich abzubilden. Als hierfür sehr gut geeigneter Ansatz wurde das physikalisch basierte Infiltrationsmodul des Niederschlag-Abflussmodells RoGeR (Runoff Generation Research) identifiziert, das an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg entwickelt wurde (STEINBRICH et al., 2016) und für das Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg die Grundlagen zur Berechnung der Oberflächenabflusskennwerte bildet (LUBW, 2016). Nachfolgend werden die Grundlagen dieses Ansatzes und seiner Implementierung in das bestehende LARSIM Bodenmodul sowie eine ergänzende einfache Berücksichtigung der Verschlammung auf Ackerflächen erläutert.

Die mathematische Abbildung der Infiltration entspricht der im Modell RoGeR (STEINBRICH et al., 2016). Dabei ist das Infiltrationsmodul in LARSIM dem eigentlichen Bodenmodul vorgeschaltet. Der Anteil des Wasserdargebots, der die aktuelle dynamisch simulierte Infiltrationskapazität überschreitet, wird als Infiltrationsüberschuss ausgewiesen und über den schnellen Direktabfluss abgeführt. Der so ausgewiesene schnelle Direktabfluss kann somit als HOF interpretiert werden. Nur der infiltrierende Anteil gelangt in das Bodenmodul und wird dort genauso weiter behandelt wie ohne Infiltrationsmodul. Für die in der vorliegenden Studie durchgeführten Berechnungen wurde der Schwellenwert A2 deaktiviert, sodass der gesamte über die BSF ermittelte Direktabfluss als langsamer Direktabfluss abgeführt

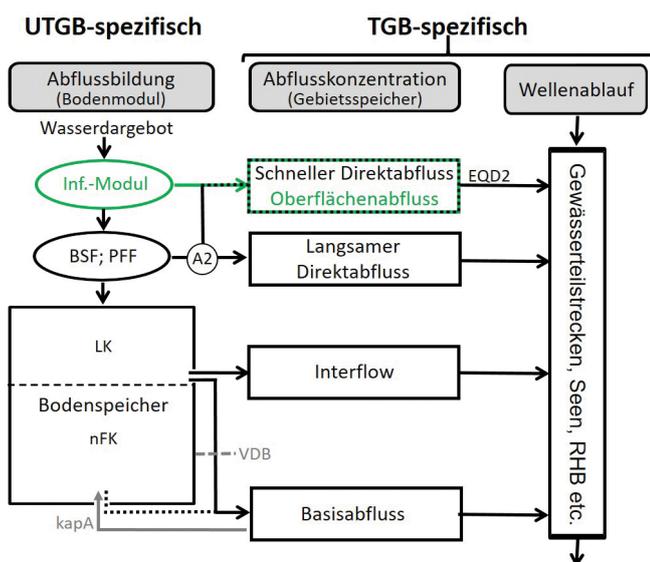


Abbildung 2
 Schematische Struktur der LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle (schwarz = bisherige Modellstruktur, grau = optionale Komponenten; grün = hier beschriebenes neues Infiltrationsmodul).
 Schematic structure of LARSIM water balance model (black = existing model structure, gray = optional components; green = newly introduced infiltration module described in this article).

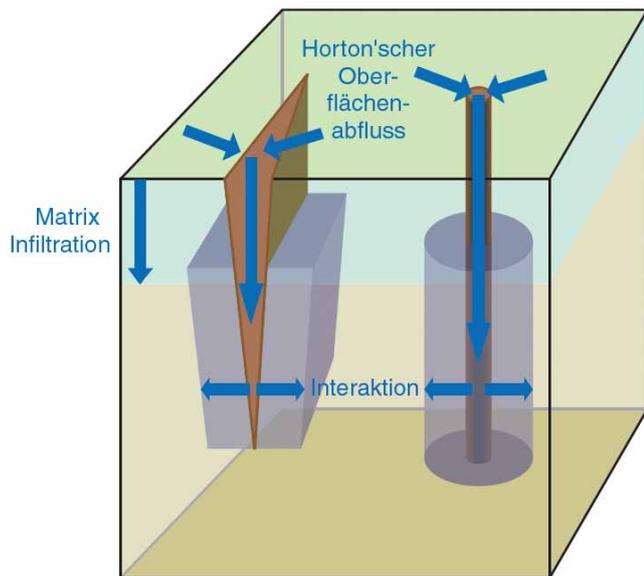


Abbildung 3
Schematische Darstellung der im Infiltrationsmodul berücksichtigten Prozesse.
Schematic representation of processes taken into account by the infiltration module.

wird. Der schnelle Direktabfluss umfasst somit nur den Horton-Oberflächenabfluss (Abb. 2). Für die Berechnung der Gesamtinfiltration werden die drei Teilprozesse der Matrix-Infiltration, der Infiltration über Makroporen und ggf. der Infiltration über Trockenrisse berücksichtigt (Abb. 3). In LARSIM wird dabei zusätzlich die infiltrationsmindernde Wirkung der Verschlämmung auf Ackerflächen vereinfacht mit einbezogen. Die Anwendung des Infiltrationsmoduls bedingt, dass kein schneller Direktabfluss gebildet wird, solange die aktuelle Infiltrationskapazität höher ist,

als die aktuelle Intensität des Wasserdargebots. Überschreitet die aktuelle Intensität des Wasserdargebots jedoch die dynamisch berechnete aktuelle Infiltrationskapazität, so kommt es zu Infiltrationsüberschuss und in der Folge zu einer schnellen Abflussreaktion.

2.2.1 Parameter und Anfangsbedingungen

Für die physikalisch basierte Berechnung der Infiltration über Matrix, Makroporen und Trockenrisse werden für jedes Unter-Teilgebiet (UTGB) die in Tabelle 1 aufgeführten Infiltrationsparameter berücksichtigt (STEINBRICH et al., 2016). Zur vereinfachten Berücksichtigung der infiltrationsmindernden Wirkung von Verschlämmung kann in LARSIM zusätzlich ein bodenartspezifischer Faktor für die Verschlammungsneigung (VF) angegeben werden (Tab. 1).

Für die Parametrisierung der Makroporen ist neben der UTGB-spezifischen Makroporendichte MP_{dichte} und der Makroporenlänge MP_{laenge} aus Tabelle 1 zusätzlich ein Makroporendurchmesser MP_{dm} erforderlich. Analog zum Ansatz in RoGeR wird hierfür vereinfachend angenommen, dass alle Makroporen einen Durchmesser von $MP_{dm} = 5 \text{ mm}$ haben, da dies dem typischen Wert für Regenwurmgänge entspricht (ausführliche Diskussion siehe STEINBRICH et al., 2016: S. 5).

Aus der Makroporendichte MP_{dichte} wird der Anteil der Landoberfläche berechnet, der in Makroporen entwässern kann (MP_{ant}). Der in WEILER (2001) für zehn Wertepaare explizit bestimmte Zusammenhang zwischen MP_{dichte} und MP_{ant} wird in LARSIM durch folgende Funktion beschrieben (LUBW, 2019):

$$MP_{ant} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{MP_{dichte}}{82}\right)^{0.887}\right) \tag{1}$$

mit:

- MP_{ant} [-] Flächenanteil, der in die Makroporen entwässern kann
- MP_{dichte} [Anzahl/m²] Anzahl der Makroporen je Quadratmeter

Tabelle 1 UTGB-spezifische Parameter des Infiltrationsmoduls. HRU specific parameters of the infiltration module		
Parameter	Einheit	Beschreibung
ks	[mm/h]	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Oberbodens. Parameter des Green-Ampt-Ansatzes.
nFK _{Vol}	[%]	Nutzbare Feldkapazität des Oberbodens als Volumen-Prozent. Zur dynamischen Ermittlung der effektiven Porosität P_{eff} als Parameter des Green-Ampt-Ansatzes.
LK _{Vol}	[%]	Luftkapazität des Oberbodens als Volumen-Prozent. Zur dynamischen Ermittlung der effektiven Porosität P_{eff} als Parameter des Green-Ampt-Ansatzes.
wsf	[mm]	Saugspannung an der Sättigungsfrennt. Parameter des Green-Ampt-Ansatzes, i. d. R. als Funktion der Textur.
MP_{dichte}	[Anzahl/m ²]	Anzahl vertikaler Makroporen je m ² zur Ermittlung des Flächenanteils, der in Makroporen entwässert (MP_{ant} , Gleichung 1) und zur Berechnung der Infiltration über Makroporen.
MP_{laenge}	[mm]	Durchschnittliche Länge (Tiefe) der vertikalen Makroporen zur Berechnung der Infiltration über Makroporen.
TR_{tiefe_max}	[mm]	Maximale Tiefe der Trockenrisse bei Wassergehalten kleiner/gleich der Schrumpfungsgrenze zur Berechnung der Infiltration über Trockenrisse.
AusrGr100	[% nFK]	Wassergehalt bei der Ausrollgrenze als Prozent der nFK. Parameter zur dynamischen Berechnung der aktuellen Trockenrisstiefe als Funktion der Bodenfeuchte.
SchrGr100	[% nFK]	Wassergehalt bei der Schrumpfungsgrenze als Prozent der nFK. Parameter zur dynamischen Berechnung der aktuellen Trockenrisstiefe als Funktion der Bodenfeuchte.
VF	[-]	Faktor zur Reduktion der Infiltrationskapazität bei maximaler Verschlämmung. Zulässiger Wertebereich 0 – 1, i. d. R. als Funktion der Textur.

Der Anteil der Fläche, welcher Anschluss an Makroporen hat, nimmt also nichtlinear mit der Makroporendichte zu. Bei den für die unterschiedlichen Landnutzungen typischen Werten von 75, 100 bzw. 150 Makroporen je Quadratmeter (Tab. 2) sind also ca. 60 %, 70 % bzw. 82 % der Oberfläche an Makroporen angeschlossen.

Für die Parametrisierung der Trockenrisse ist neben der UTGB-spezifischen maximalen Trockenrisstiefe $TR_{\text{tiefe_max}}$ auch eine Annahme zur räumlichen Dichte der Trockenrisse erforderlich. Analog zu RoGeR wird davon ausgegangen, dass die Trockenrisse unabhängig von sonstigen Bodeneigenschaften ein regelmäßiges Gitter ausbilden, in dem die einzelnen Trockenrisse einen Abstand von 20 cm voneinander haben. Entsprechend ergibt sich eine Trockenrisssdichte TR_{str} von 10 m/m^2 (Diskussion zur Herleitung siehe STEINBRICH et al., 2016: S. 5 – 6).

Zu Beginn eines Ereignisses werden als Anfangsbedingungen zur Berechnung der Infiltration 1) die aktuelle effektive Porosität im Oberboden P_{eff} in Volumenanteilen [-] und 2) die aktuelle tatsächliche Tiefe der Trockenrisse TR_{tiefe} [mm] bestimmt. P_{eff} ergibt sich aus der Summe der zu Ereignisbeginn freien nFK_{Vol} und der LK_{Vol} des Oberbodens. Wie im Modell RoGeR wird davon ausgegangen, dass im Oberboden immer mindestens die Luftkapazität LK zur Verfügung steht. Hinsichtlich der aus dem nFK -Anteil der Poren ggf. zusätzlich verfügbaren P_{eff} wird vereinfachend angenommen, dass die aktuelle Bodenfeuchte des Gesamtbodenspeichers repräsentativ für die aktuelle Feuchte des Oberbodens ist (LUBW, 2019).

Zur Ermittlung der aktuellen Tiefe der Trockenrisse TR_{tiefe} bei Ereignisbeginn werden die entsprechenden UTGB-spezifischen Parameter aus Tabelle 1 und die aktuelle Füllung des Bodenspeichers (Bodenfeuchte) herangezogen. Wenn die aktuell simulierte Bodenfeuchte größer/gleich der Bodenfeuchte bei der Ausrollgrenze ($AusrGr100$) ist, liegen keine Trockenrisse vor. Ist die aktuelle Bodenfeuchte kleiner/gleich der Bodenfeuchte bei der Schrumpfungsgrenze ($SchrGr100$), haben die Trockenrisse ihre maximale Tiefe ($TR_{\text{tiefe_max}}$). Liegt die aktuelle Bodenfeuchte zwischen den beiden Grenzwerten, wird die Trockenrisstiefe TR_{tiefe} linear zwischen Null und $TR_{\text{tiefe_max}}$ interpoliert (LUBW, 2019). Die tatsächliche aktuelle Tiefe der Trockenrisse bleibt während des Ereignisses konstant. Die tatsächlich infiltrationswirksame Tiefe wird während des Ereignisses jedoch durch die von oben vorrückende Matrix-Infiltrationsfront verkürzt (siehe unten).

2.2.2 Matrix-Infiltration

Die vertikale Infiltration über die Bodenmatrix wird über den Ansatz von GREEN & AMPT (1911) unter Berücksichtigung variabler Niederschlagsintensitäten nach PESCHKE (1985) abgebildet. Die physikalisch basierte Green-Ampt-Approximation geht von einer gleichförmigen Sättigungsfront aus, an welcher eine texturspezifische Saugspannung wirkt. Die Infiltrationsrate der Bodenmatrix hängt neben dieser Saugspannung an der Sättigungsfront (wsf) von der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens (ks), dem effektiven Porenvolumen (P_{eff}) zu Beginn des Ereignisses (Anfangsbedingung) und der Niederschlagsintensität ab. Bis zu dem Zeitpunkt, zu dem eine Sättigung der Bodenmatrix an der Oberfläche auftritt, kann das gesamte Wasserdargebot über die Matrix infiltrieren. Der Sättigungszeitpunkt (ts in [h]) sowie die bis dahin infiltrierte Wassermenge (F_s in [mm]) wird mithilfe der

Gleichungen 10 und 12 in PESCHKE (1985) berechnet. Für alle darauffolgenden Zeitschritte lässt sich die kumulierte potenzielle Matrix-Infiltration wie folgt ausdrücken (PESCHKE, 1985):

$$F_{\text{pot}}(t) = \frac{ks \cdot (t - ts)}{2} + \sqrt{\frac{(ks \cdot (t - ts))^2}{4} + (ks \cdot (t - ts)) \cdot (wsf \cdot P_{\text{eff}} \cdot 2 + Fs) + Fs^2} \quad (2)$$

mit:

$F_{\text{pot}}(t)$ [mm]	kumulative potenzielle Matrix-Infiltration bis einschließlich dem aktuellen Zeitschritt
t [h]	Zeit seit Ereignisbeginn
ts [h]	Zeitpunkt der Sättigung an der Oberfläche (time to ponding)
F_s [mm]	über die Matrix bis zum Zeitpunkt ts tatsächlich infiltrierte Wassermenge

Alle anderen Parameter sind in Tabelle 1 erläutert. Die potenzielle Matrix-Infiltration für den aktuellen Zeitschritt (= aktuelle Infiltrationskapazität) ergibt sich wie folgt:

$$f_{\text{pot}}(t) = F_{\text{pot}}(t) - F_{\text{pot}}(t - 1) \quad (3)$$

mit:

$f_{\text{pot}}(t)$ [mm]	potenzielle Matrix-Infiltration im aktuellen Zeitschritt
--------------------------	--

Die tatsächliche Matrix-Infiltration im aktuellen Zeitschritt wird ggf. durch das Wasserdargebot limitiert:

$$f_{\text{matrix}}(t) = \text{Minimum}(N(t), f_{\text{pot}}(t)) \quad (4)$$

mit:

$f_{\text{matrix}}(t)$ [mm]	tatsächliche Matrix-Infiltration im aktuellen Zeitschritt
$N(t)$ [mm]	Wasserdargebot im aktuellen Zeitschritt

Neben der Infiltration wird die Eindringtiefe der Matrix-Sättigungsfront SFT berechnet, um zu berücksichtigen, wie sich die infiltrationswirksame Tiefe der Makroporen und der Trockenrisse dadurch verkürzt (Abb. 3):

$$SFT(t) = \frac{F_{\text{matrix}}(t)}{P_{\text{eff}}} \quad (5)$$

mit:

$SFT(t)$ [mm]	Tiefe der Matrix-Sättigungsfront im aktuellen Zeitschritt
$F_{\text{matrix}}(t)$ [mm]	über die Matrix bis zum Zeitschritt t tatsächlich infiltrierte Wassermenge $\sum f_{\text{matrix}}(i)$

2.2.3 Makroporen-Infiltration

Wenn das Wasserdargebot die aktuelle Infiltrationskapazität der Bodenmatrix übersteigt, entsteht zunächst potenzieller Horton-Oberflächenabfluss ($HOF_{\text{pot,matrix}}$). Je nach Dichte der Makroporen gelangt ein Teil dieses Infiltrationsüberschusses in die Makroporen (Gleichung 1). So fließen z. B. bei einer für Grünland typischen Makroporendichte von 100 Makroporen je Quadratmeter (Tab. 2) ca. 70 % des $HOF_{\text{pot,matrix}}$ in die Makroporen, während ca. 30 % als HOF weiterfließen. Der Anteil des potenziellen HOF , der in die Makroporen gelangt, kann von dort wiederum lateral in den

Boden infiltrieren (Abb. 3). Dieser Infiltrationsprozess aus den Makroporen in die Bodenmatrix wird mit dem Green-Ampt-Ansatz für horizontale, radialsymmetrische Infiltration simuliert (BEVEN & CLARKE, 1986; WEILER, 2005). Zunächst wird die horizontale Eindringtiefe der radialsymmetrischen Infiltrationsfront MP_{SFY} mit der analytischen Lösung von WEILER (2005) berechnet (Gleichung 6 in WEILER, 2005). Aus dem Voranschreiten von MP_{SFY} lässt sich die potenzielle Infiltration aus den Makroporen in die Bodenmatrix für den aktuellen Zeitschritt berechnen:

$$fMP_{pot}(t) = (MP_{laenge} - SFT(t)) \cdot \pi \cdot P_{eff} \cdot \frac{MP_{SFY}(t)^2 - MP_{SFY}(t-1)^2}{10^6} \quad (6)$$

mit:

$fMP_{pot}(t)$ [mm] potenzielle Makroporen-Infiltration im aktuellen Zeitschritt
 MP_{SFY} [mm] aktuelle Distanz der horizontalen Sättigungsfront vom Porenrand

Die tatsächliche Makroporen-Infiltration im aktuellen Zeitschritt wird ggf. durch das in den Makroporen verfügbare Wasserdargebot limitiert:

$$f_{mp}(t) = \text{Minimum} \left((HOF_{pot,matrix}(t) \cdot MP_{ant}), fMP_{pot}(t) \right) \quad (7)$$

mit:

$f_{mp}(t)$ [mm] tatsächliche Makroporen-Infiltration im aktuellen Zeitschritt
 $HOF_{pot,matrix}(t)$ [mm] potenzieller HOF im aktuellen Zeitschritt nach Berechnung der Matrixinfiltration

Übersteigt der Zufluss in die Makroporen die potenzielle Makroporen-Infiltration, so bildet die Differenz zusätzlichen potenziellen HOF, der zu jenem Anteil des $HOF_{pot,matrix}$ hinzuaddiert wird, der den Makroporen überhaupt nicht zufließt. Hieraus resultiert dann der potenzielle HOF nach Berücksichtigung der Makroporen-Infiltration $HOF_{pot,mp}$.

2.2.4 Trockenriss-Infiltration

In Abhängigkeit vom Tongehalt und der aktuellen Bodenfeuchte kann der Boden neben Makroporen ggf. auch Trockenrisse aufweisen. Für Trockenrisse wird vereinfachend angenommen, dass sie ein Gitter ausbilden. Im Gegensatz zu Makroporen kann beim Vorliegen von Trockenrissen daher davon ausgegangen werden, dass der gesamte verbleibende $HOF_{pot,mp}$ zunächst in die Trockenrisse gelangt. Die Berechnung der Infiltration aus den Trockenrissen in die Bodenmatrix erfolgt weitgehend analog zur Berechnung für die Makroporen. Dabei wird von einer spiegelsymmetrischen horizontalen Infiltration über beide Seiten des jeweiligen Trockenrisses ausgegangen. Entsprechend lässt sich auch hier aus dem Voranschreiten der spiegelsymmetrischen horizontalen Infiltrationsfront TR_{SFY} die potenzielle Infiltration aus den Trockenrissen in die Bodenmatrix für den aktuellen Zeitschritt berechnen:

$$fTR_{pot}(t) = (TR_{tiefe} - SFT(t)) \cdot P_{eff} \cdot TR_{str} \cdot (TR_{SFY}(t) - TR_{SFY}(t-1)) \cdot \frac{2}{10^6} \quad (8)$$

mit:

$fTR_{pot}(t)$ [mm] potenzielle Trockenriss-Infiltration im aktuellen Zeitschritt

TR_{tiefe} [mm] tatsächliche Tiefe der Trockenrisse
 TR_{str} [mm/m²] Trockenrissdichte: Strecke je Fläche (= 10.000 mm/m²)
 TR_{SFY} [mm] aktuelle Distanz der Sättigungsfront vom Trockenrissrand

Die tatsächliche Trockenriss-Infiltration im aktuellen Zeitschritt wird ggf. durch das in den Trockenrissen verfügbare Wasserdargebot limitiert:

$$f_{tr}(t) = \text{Minimum} (HOF_{pot,mp}(t), fTR_{pot}(t)) \quad (9)$$

mit:

$f_{tr}(t)$ [mm] tatsächliche Trockenriss-Infiltration im aktuellen Zeitschritt
 $HOF_{pot,mp}(t)$ [mm] potenzieller HOF im aktuellen Zeitschritt nach Berechnung der Makroporen-Infiltration

2.2.5 Berücksichtigung der Verschlämmung

Die infiltrationsmindernde Wirkung der Verschlämmung kann in LARSIM mithilfe eines Reduktionsfaktors RF (Wertebereich 0 – 1) überschlägig berücksichtigt werden. Da sich die Verschlämmung auf alle drei hier berücksichtigten Teilprozesse auswirkt, werden dabei die für alle drei Prozesse ermittelten UTGB-spezifischen potenziellen Infiltrationsraten durch Multiplikation mit RF gleichermaßen reduziert (LUBW, 2019).

Der zum aktuellen Zeitpunkt für das jeweilige UTGB verwendete Reduktionsfaktor berücksichtigt die Bodenart, die Landnutzung und die Jahreszeit. Der bei maximaler Verschlämmung im jeweiligen UTGB vorliegende minimale Reduktionsfaktor ist durch VF (Wertebereich 0 – 1) festgelegt (Tab. 1). Bodenarten, die zur starken Verschlämmung neigen, werden entsprechend durch einen niedrigen VF-Wert charakterisiert (z. B. 0,3), während Bodenarten mit geringer Verschlammungsneigung höhere VF-Werte erhalten (z. B. 0,7). Das tatsächliche Ausmaß der Verschlämmung hängt darüber hinaus von zahlreichen weiteren Faktoren ab, von denen die Bodenbedeckung durch Pflanzen inklusive der Ausbildung ihrer Wurzeln sowie der Zeitpunkt der letzten Bodenbearbeitung zu den wichtigsten zählen (HARTGE & HORN, 2009). Diese Einflüsse werden in LARSIM vereinfachend über einen landnutzungsspezifischen und jahreszeitlich variablen Faktor für den tatsächlichen Verschlammungsgrad VG abgebildet. Auch VG kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 1 für das Erreichen der maximal möglichen Verschlämmung steht. Der jeweilige Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung der Verschlammungswirkung ergibt sich entsprechend wie folgt:

$$RF = VF + (1 - VF) \cdot (1 - VG) \quad (10)$$

mit:

RF [-] Faktor zur verschlammungsbedingten Reduktion der potenziellen Infiltrationsraten (Wertebereich: 0 – 1)

VF [-] UTGB-spezifischer Faktor, mit dem die potenziellen Infiltrationsraten bei potenziell maximaler Verschlämmung (d. h. VG = 1) reduziert werden (Wertebereich: 0 – 1); i. d. R. in Abhängigkeit der Bodenart

VG [-] landnutzungsspezifischer, jahreszeitlich variabler Faktor zur Berücksichtigung des tatsächlichen Ausmaßes der Verschlammung (Wertebereich: 0 – 1)

2.2.6 Gesamt-Infiltration und resultierender HOF

Die gesamte Infiltration ergibt sich aus der Summe der drei Teilprozesse:

$$f_{tot}(t) = f_{matrix}(t) + f_{mp}(t) + f_{tr}(t) \tag{11}$$

mit:

$f_{tot}(t)$ [mm] Gesamt-Infiltration im aktuellen Zeitschritt

Folglich resultiert der Infiltrationsüberschuss bzw. HOF aus der Differenz des Wasserdargebots und der Gesamt-Infiltration:

$$HOF(t) = Maximum(0, (N(t) - f_{tot}(t))) \tag{12}$$

mit:

HOF(t) [mm] Horton-Oberflächenabfluss im aktuellen Zeitschritt

Die Gesamt-Infiltration wird dem nachgeschalteten Bodenspeicher zugeführt und beeinflusst somit dessen Füllung und Verhalten. Der ausgewiesene HOF wird über den schnellen Direktabfluss abgeführt (Abb. 2).

2.3 Flächendifferenzierte Parametrisierung des Infiltrationsmoduls

Die für den unter 2.2 beschriebenen Berechnungsansatz erforderlichen Parameterwerte (Tab. 1) können in der Regel direkt aus mittelmaßstäblichen Bodenkarten entnommen werden oder indirekt über geeignete Pedotransferfunktionen aus der Textur (Bodenart) und der Landnutzung abgeschätzt werden (STEINBRICH et al., 2016; LUBW, 2019).

Für Baden-Württemberg lag bereits eine an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg abgeleitete landesweite Parametrisierung für das Modell RoGeR vor (STEINBRICH et al., 2016), die im Wesentlichen auf der Bodenkarte 1 : 50.000 (BK50) (LGRB, 2017) und Landnutzungsdaten basiert. Auf dieser Grundlage wurde zunächst im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) eine Parametrisierungsstrategie für die existierenden LARSIM-WHM für die gesamte Landesfläche entwickelt und angewandt (LUBW, 2019). Die nutzbare Feldkapazität in Volumenprozent nFK_{Vol} , die Luftkapazität in Volumenprozent LK_{Vol} und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_s für den Oberboden sowie Angaben zur Bodenart und zum Tongehalt konnten dabei direkt aus den durch das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) Baden-Württemberg bereitgestellten Bodendaten im Maßstab 1 : 50.000 entnommen werden.

Die bei trockenem Boden maximal mögliche Tiefe von Trockenrissen TR_{tiefe_max} der ton-

haltigen Böden wurde auf Basis der Arbeiten von STEINBRICH et al. (2016) so abgeschätzt, dass beim in Baden-Württemberg maximalen Tongehalt von 68 % eine maximale Trockenrisstiefe von 500 mm erreicht wird (STEINBRICH et al., 2016; LUBW, 2019):

$$TR_{tiefe_max} = 7,35 \cdot Ton \tag{13}$$

mit:

Ton [%] prozentualer Tongehalt im Oberboden

Für die in Süddeutschland häufig auftretende Bodenart schluffiger Lehm (Lu), mit ca. 25 % Tongehalt, ergeben sich entsprechend maximale Trockenrisstiefen von ca. 18 cm. Um die aktuelle Tiefe der Trockenrisse als Funktion der simulierten Bodenfeuchte berechnen zu können, wurden zusätzlich die Wassergehalte an der Ausrollgrenze AusrGr100 und der Schrumpfungsgrenze SchrGr100 anhand der Bodenart auf Basis der Pedotransferfunktion von WESSOLEK et al. (2009) bestimmt.

Für die Saugspannung an der Sättigungsfront wsf konnte auf eine bodenartspezifische Zuordnungstabelle zurückgegriffen werden, die an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg abgeleitet worden war (STEINBRICH & WEILER, 2012; zur Herleitung siehe WEILER, 2005 und STEINBRICH et al., 2016).

Die Makroporendichte MP_{dichte} und die Makroporenlänge MP_{laenge} wurden analog zum Vorgehen in RoGeR auf Basis der Landnutzung abgeschätzt (Tab. 2). Der zusätzliche Einfluss des Skelettgehalts auf MP_{dichte} wurde wie folgt abgeschätzt: Für volumetrische Skelettgehalte von 25 % bis 50 % erfolgte ein Zuschlag von +50 Makroporen je m^2 , für 10 % bis 25 % und 50 % bis 70 % erfolgte ein Zuschlag von +25 Makroporen je m^2 . Für die Skelettgehalte unter 10 % und über 70 % wurde keine Veränderung der Makroporendichte vorgenommen. Es ist selbstverständlich davon auszugehen, dass die tatsächliche räumliche (und zeitliche) Heterogenität der Makroporen von zahlreichen weiteren Faktoren beeinflusst wird (CAPOWIEZ et al., 2014; PELOSI et al., 2017; RECK et al., 2018). Allerdings ist es bislang nicht möglich, die Wirkung dieser Einflussfaktoren großräumig und allgemeingültig zu quantifizieren (BLOUIN et al., 2013). Entsprechend stellt

Tabelle 2
 Parametrisierung der Makroporendichte MP_{dichte} und der Makroporenlänge MP_{laenge} auf Basis der in LARSIM verwendeten Landnutzungsklassen (STEINBRICH et al., 2016; LUBW, 2019).
Parameterization of frequency of macropores (MP_{dichte}) and length of macropores (MP_{laenge}) based on land use classes considered in LARSIM (STEINBRICH et al., 2016; LUBW, 2019).

Landnutzung	MP_{dichte} [Anzahl/ m^2]	MP_{laenge} [mm]
unversiegelte Flächen in Siedlungsbereichen	75	300
vegetationslose und extensiv genutzte Flächen	75	300
Acker	75	300
Feuchtflehen	100	300
locker baumbestandene Flächen	100	300
Obst- und Weinbau	100	500
Grünland	100	800
Nadelwald	150	300
Laubwald	150	500
Mischwald	150	500

die hier vorgenommene Abschätzung der räumlichen Verteilung der Makroporosität eine sehr grobe aber robuste Grundlage für ein großräumiges Modell dar (STEINBRICH et al., 2016).

Für die in LARSIM implementierte überschlägige Berücksichtigung der Verschlammung konnte auf eine grobe zweistufige Klassifizierung in stark verschlammungsgefährdete Böden ($VF = 0,3$) und mäßig verschlammungsgefährdete Böden ($VF = 0,7$) zurückgegriffen werden, die in den Bodendaten des LGRB bereits vorlag. Liegt keine solche Klassifikation in den Bodendaten vor, so kann sie anhand der Bodenart mithilfe der Tabellen zur Verschlammungsneigung bzw. Erodierbarkeit aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung erfolgen (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005). Für die hier vorliegenden Analysen wurde davon ausgegangen, dass Verschlammung nur auf Ackerböden auftritt. Für alle anderen Landnutzungen wurde daher ganzjährig ein Verschlammungsgrad $VG = 0$ angesetzt, sodass bei diesen Landnutzungen keine Infiltrationsminderung durch Verschlammung simuliert wird (Gleichung 10). Für die Landnutzung Acker wurde in Abstimmung mit dem LGRB ein mittlerer Jahresgang von VG auf Basis einer für Baden-Württemberg charakteristischen Bewirtschaftung abgeschätzt (LUBW, 2019). Dabei wird für April und Mai von minimaler Bodenbedeckung und in der Folge maximaler Verschlammung ($VG = 1$) ausgegangen. Bei den nachfolgend untersuchten Starkregen im Mai wird also davon ausgegangen, dass die potenziellen Infiltrationsraten auf Acker mit stark verschlammungsgefährdeten Böden ($VF = 0,3$) mit dem Faktor $RF = 0,3$ reduziert werden. Für die Ereignisse im Juni ($VG = 0,85$) und Juli ($VG = 0,8$) ergeben sich für Acker mit stark verschlammungsgefährdeten Böden etwas geringere Reduktionen $RF = 0,41$ bzw. $RF = 0,44$ (Gleichung 10).

Durch Verschneidung der Infiltrationsparameter mit weiteren für LARSIM relevanten Bodenparametern (z. B. nFK und LK bis 1 m Bodentiefe in [mm], vertikale Durchlässigkeitsbeiwerte VDB , maximale kapillare Aufstiegsraten $kapA$ [mm/h]), der Landnutzung und den Teilgebieten (TGB) des Modells ergeben sich die hoch aufgelösten Polygone der LARSIM-UTGB (Hydrotope), auf deren räumlicher Auflösung die Infiltration und die Abflussbildung simuliert werden (Abb. 1). Durch die hohe räumliche Differenzierung der UTGB ist die Simulation einer räumlich stark differenzierten Reaktion auf Starkregen möglich, wenngleich die UTGB innerhalb der TGB nicht räumlich verortet sind.

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Verbundprojekts wurde die für Baden-Württemberg verwendete Parametrisierungsstrategie für die Verwendung der BK50 für Nordrhein-Westfalen angepasst (IS BK 50, Informationssystem Bodenkarte von NRW, GEOLOGISCHER DIENST NRW, 2018). Dabei konnte grundsätzlich genauso vorgegangen werden, wie dies oben für Baden-Württemberg beschrieben ist. Die Parametrisierung erfolgte für die Einzugsgebiete der Großen Dhünn und der Sülz, die teilweise in das Dhünn-Einzugsgebiet übergeleitet wird (KRUMM et al., 2020).

Für die Anwendung im Dhünn- und Sülz-Einzugsgebiet stand jedoch nicht die Simulation von starkregenbedingten Hochwassern im Vordergrund. Vielmehr sollten hier die mögliche Abschwemmung und Erosion von landwirtschaftlich genutzten Flächen auf Grundlage des dort auftretenden HOF bestmöglich abgebildet werden. Insofern wurde das Infiltrationsmodul hier verwendet, um HOF infolge intensiver, aber nicht unbedingt sehr extremer Niederschläge zu simulieren (KRUMM et al., 2020).

Die am Beispiel von Baden-Württemberg entwickelte Parametrisierungsstrategie (LUBW, 2019) wurde außerdem vom Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU) angewendet, um das Einzugsgebiet der Mosel (inkl. dem luxemburgischen Sauergebiet) entsprechend zu parametrisieren (BERNDT, 2020; HENGST, 2021). Diese Parametrisierung wurde für die Simulation der Starkregenereignisse an der Weißen Ernz in Luxemburg verwendet (AGE, 2020).

3 Untersuchungsgebiete und Ereignisse

Abbildung 4 und Tabelle 3 geben einen Überblick über die fünf Einzugsgebiete und sieben Ereignisse, die in der vorliegenden Studie untersucht wurden. Weitere Informationen zum jeweiligen Gebietsniederschlag können den Abbildungen 6 und 9 entnommen werden. Die Untersuchungsgebiete erstrecken sich über drei Gebiete mit unterschiedlichen Grundlagen für die Bodendaten. Dadurch wird es möglich, zu bewerten, ob die zunächst für Baden-Württemberg abgeleitete Parametrisierungsstrategie auch auf andere Länder mit anderen Datengrundlagen übertragen werden kann. Soweit verfügbar, wurden möglichst relevante starkregenbedingte Abflussereignisse mit hoher Jährlichkeit für die Analyse herangezogen. Sofern in einem der betroffenen Einzugsgebiete ein weiteres (kleineres) starkregenbedingtes Hochwasser vorlag, wurde dieses zu Vergleichszwecken in die Analyse mit aufgenommen.

Für Baden-Württemberg wurden insgesamt 20 Starkregenereignisse in 16 Einzugsgebieten analysiert (LUBW, 2019; HAAG et al.,

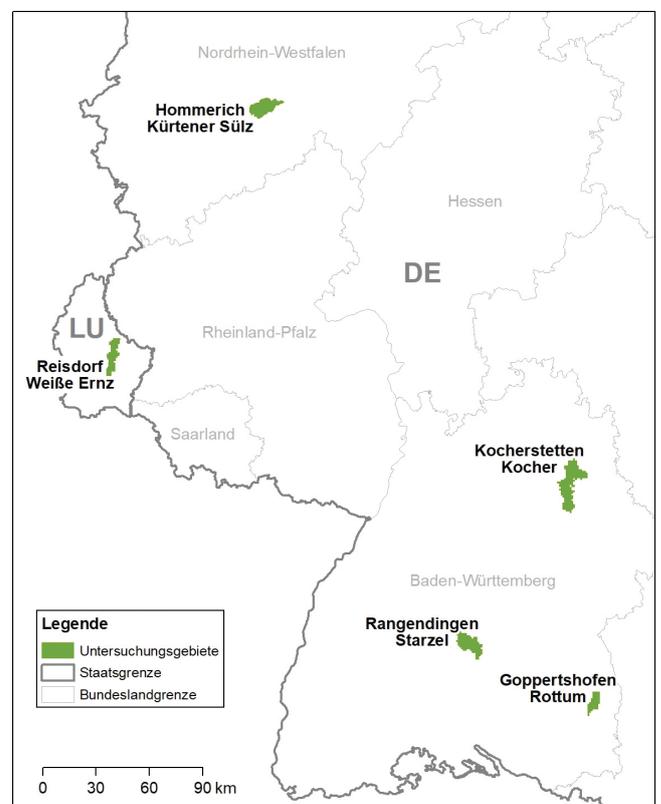


Abbildung 4
Lage der fünf untersuchten Einzugsgebiete.
Location of the five analyzed catchments.

Tabelle 3

Übersicht über die untersuchten Einzugsgebiete (EZG) und Ereignisse.
Overview of catchments (EZG) and flood events analyzed in this study.

Pegel	Gewässer	EZG-Fläche [km ²]	Ereignis	Abfluss-Jährlichkeit
Rangendingen	Starzel	123	02.06.2008	HQ100
Kocherstetten	Kocher	1.288 ¹	29.05.2016	HQ10 ¹
Goppersthoven	Rottum	57	29.05.2016	HQ100
			24.06.2016	HQ100
Reisdorf	Weiße Ernz	102	22.07.2016	HQ100
			01.06.2018	HQ2
Hommerich	Kürtener Sülz	64	20.06.2013	HQ5

¹ Relevant für die Analyse bei Kocherstetten ist das 214 km² große Zwischen-EZG des Pegels, in dem der Abfluss eine deutlich höhere Jährlichkeit als HQ10 aufwies.

2019b). Aufgrund der hohen Abflussjährlichkeit bzw. Relevanz der in ihnen aufgetretenen Ereignisse wurden hieraus die drei in Tabelle 3 aufgeführten Einzugsgebiete für die hier durchgeführte detailliertere Analyse ausgewählt. Dabei ist anzumerken, dass der Orlacher Bach (ohne Pegel), der durch die Gemeinde Braunsbach fließt, oberhalb des Pegels Kocherstetten in den Kocher mündet. Das für den Pegel Kocherstetten/Kocher analysierte Ereignis vom Mai 2016 umfasst somit auch das verheerende lokale Katastrophen-Ereignis in Braunsbach (BRONSTERT et al., 2017). Das relevante Starkregenereignis ereignete sich dabei ausschließlich im Zwischeneinzugsgebiet des Pegels Kocherstetten, das oberstromig durch die Pegel Geislingen/Bühler, Westheim/Bibers und Gaildorf/Kocher begrenzt wird. Für die Analyse des Ereignisses bei Kocherstetten (bzw. Braunsbach) wurde daher nur das 214 km² große Zwischeneinzugsgebiet herangezogen und die Zuflüsse von oberhalb durch die Messungen an den drei genannten Zuflusspegeln berücksichtigt. Für die starkregenbedingte Abflussbildung im Zwischeneinzugsgebiet von Kocherstetten wird also sicherlich eine wesentlich höhere Jährlichkeit als HQ10 erreicht.

In Luxemburg trat im Juli 2016 ein starkregeninduziertes Hochwasser an der Weißen Ernz auf, das in AGE (2020) untersucht wurde. Darüber hinaus konnte zu Vergleichszwecken ein zweites kleineres Ereignis vom Juni 2018 in die Analyse mit aufgenommen werden. Die Jährlichkeiten für die beiden Ereignisse wurden aus der Hochwasser-Regionalisierung für Luxemburg entnommen.

Für Nordrhein-Westfalen lagen mit dem Infiltrationsmodul parametrisierte Modelle nur für die Einzugsgebiete von Dhünn und Sülz vor (KRUMM et al., 2020). Auf Basis einer Analyse der Niederschlagsintensitäten und der gemessenen Abflussreaktion im Zeitraum 2004 bis Mitte 2018 wurde das starkregeninduzierte Hochwasser mit der größten Jährlichkeit identifiziert. Dabei handelt es sich um das hier näher untersuchte Ereignis an der Kürtener Sülz vom Juni 2013, das allerdings nur einem HQ5 entspricht und somit eine deutlich geringere Jährlichkeit als die anderen hier untersuchten Ereignisse aufweist.

4 Datengrundlage und Anpassung der Radarniederschläge

4.1 Abfluss, Niederschlag und Meteorologie

Abflussmessungen lagen für Baden-Württemberg und Luxemburg in 15-Minuten-Zeitschritten vor und wurden von der Landesanstalt für Umwelt (LUBW) bzw. der Administration de la

gestion de l'eau (AGE) zur Verfügung gestellt. Für den Pegel Hommerich in Nordrhein-Westfalen wurden die als Stundenwerte durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) bereitgestellten Daten verwendet. Zudem standen für alle Untersuchungsgebiete Stationsdaten als langjährige plausibilisierte Stundenwert-Zeitreihen für die Parameter Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Luftdruck zur Verfügung (LUBW, 2019; AGE, 2020; KRUMM et al., 2020). Diese Stationsdaten wurden für die unten beschriebenen LARSIM-Simulationen in Stundenschritten verwendet.

Für den Niederschlag wurden für die Ereigniszeiträume zudem RADKLIM-YW-Daten aus der Radarklimatologie des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten und einer räumlichen Auflösung von 1 km² genutzt (WINTERRATH et al., 2018). Die YW-Daten werden vom DWD an Niederschlags-Stationsdaten quasi angeeicht (WINTERRATH et al., 2017). In Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen kamen die Daten der Version 17.002 zum Einsatz, für Luxemburg wurden Daten der Version 19.001 verwendet. Im vorliegenden Fall wurden diese Datensätze zu 15-Minutenwerten aggregiert und dann als Antriebsdaten für die unten beschriebenen Simulationen in 15-Minuten-Zeitschritten verwendet.

Für die vorliegende Untersuchung standen teilweise mehr Niederschlags-Stationsdaten zur Verfügung als dem DWD für die Aneichung des RADKLIM-Produkts. Daher wurde in einigen Fällen eine weitergehende Anpassung an diese zusätzlichen Stations-Niederschläge vorgenommen (siehe Kapitel 4.2).

Für die beiden Ereignisse am Pegel Goppertshoven/Rottum wurde zusätzlich das Radarprodukt SuperHD der Firma Meteorlogix (SuperHD Radar Level1 Kalibrierung aus dem Jahr 2018) verwendet, das von der LUBW zur Verfügung gestellt wurde. Das SuperHD-Produkt weist eine zeitliche Auflösung von 5 Minuten und eine räumliche Auflösung von 250 m x 250 m auf. Die Daten beruhen auf denselben Radarmessungen wie RADKLIM-YW, unterscheiden sich jedoch durch die Aufbereitung (z. B. Z-R-Beziehung, Korrekturverfahren, Aneichmethoden). Auch die SuperHD-Daten wurden von 5-Minutenwerten zu 15-Minutenwerten aggregiert.

4.2 Ermittlung des bestmöglichen Niederschlags für die Ereignisse

Die Simulation der Abflussreaktion kleiner Einzugsgebiete auf lokal begrenzte (und kurze, intensive) Starkregenereignisse ist stark abhängig von einer präzisen räumlichen und zeitlichen Erfassung der tatsächlichen Niederschlagsintensität (VILLINGER et al., 2017; GÖPPERT, 2018; LUBW, 2019). Niederschlagsstationen erfassen die tatsächlichen Niederschlagsintensitäten punktuell am besten. Aufgrund der Kleinräumigkeit konvektiver Starkregenereignisse ist die Wahrscheinlichkeit jedoch hoch, dass die Niederschlagszelle nicht oder nur randlich von einer Niederschlagsstation erfasst wird. Wenn die maximalen Niederschlagsintensitäten durch eine Station erfasst werden, ist die Ausdehnung der Niederschlagszelle ohne zusätzliche Informationen schwer abgrenzbar. Räumliche Interpolationsmethoden können

in beiden Fällen keine bzw. keine optimale Abhilfe schaffen. Im Gegensatz zu Stationsdaten erfassen Radarmessungen die räumliche (und zeitliche) Verteilung des Niederschlags in hoher Auflösung, nicht jedoch die zugehörigen Niederschlagsintensitäten. Die Kombination beider Messmethoden ist zur Erfassung von Starkregen daher unumgänglich und wird von den Anbietern von Radarprodukten mit aufwändigen Prozessierungen und Aneichungen der Radarmessungen umgesetzt (WINTERRATH et al., 2017).

Allerdings sind auch die angeeichten Radarprodukte noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet (LUBW, 2019; HAAG et al., 2019b). In der vorliegenden Studie wurde daher versucht, diese Unsicherheit soweit möglich weiter zu reduzieren bzw. ihren Einfluss auf die Abflusssimulation zu bewerten. Hierfür wurde aus den vorhandenen Daten ein "bestmöglicher" Niederschlagsinput ausgewählt bzw. abgeleitet. Aufgrund der Unterschiede in der Datenverfügbarkeit wurde dabei für die einzelnen Ereignisse unterschiedlich vorgegangen. Das Vorgehen wird nachfolgend erläutert.

4.2.1 Anpassung der RADKLIM-Daten an zusätzliche Stationsdaten (Hommerich, Reisdorf, Rangendingen)

In den Untersuchungsgebieten waren teilweise Messwerte von Niederschlagsstationen verfügbar, welche dem DWD für die Aneichung der RADKLIM-Daten nicht zur Verfügung stehen. In Baden-Württemberg sind dies v. a. Stationen aus dem LUBW Luftmessnetz sowie Stationen kommunaler und privater Betreiber. Im Einzugsgebiet der Dhünn/Sülz liegen zusätzliche Daten mehrerer vom Wupperverband betriebenen Niederschlagsstationen vor und in Luxemburg wurden zusätzliche Daten aus dem Messnetz der ASTA (Administration des Services Techniques de l'Agriculture) bereitgestellt.

Um den bestmöglichen Niederschlagsinput für die untersuchten Ereignisse zu bestimmen, wurden die Daten der jeweils zusätzlich verfügbaren Stationen mit den Radardaten verglichen. Dazu wurde jeweils der relevante Niederschlagszeitraum eines Ereignisses eng eingegrenzt. Dann wurden die Niederschlagssummen der Stationen für diesen Zeitraum mit den Niederschlagssummen des Radarprodukts an den zugehörigen Radarpixeln verglichen. Anhand der Lage der Stationen, der Ausdehnung der Niederschlagszelle in den Radardaten sowie den Differenzen der Niederschlagssummen wurde für jedes Ereignis bzw. Gebiet einzeln beurteilt, ob die Nutzung der zusätzlichen Stationen einen Informationszugewinn darstellt. Anhand der räumlichen Auswertung konnte auch beurteilt werden, wie gut die jeweiligen maximalen Niederschlagsintensitäten in den Radardaten durch Stationsdaten (egal ob beim DWD oder nachträglich verfügbar) belegt sind.

Für die Einzugsgebiete von Hommerich und Reisdorf ergab sich durch die zusätzlichen Stationsdaten ein erheblicher Informationszugewinn. In Baden-Württemberg lag für das Einzugsgebiet von Rangendingen

eine zusätzliche relevante Station vor. Für Kocherstetten und Goppertshofen ergab sich aus den zusätzlich verfügbaren Stationen allerdings kein Informationszugewinn. Daher wurde für die Ereignisse an den Pegeln Hommerich, Reisdorf und Rangendingen eine zusätzliche Anpassung der Radardaten durchgeführt. Für Goppertshofen und Kocherstetten wurde eine abweichende Vorgehensweise gewählt, die unten erläutert wird.

Die zusätzliche Anpassung der Radardaten erfolgte anhand der Quotienten aus den Niederschlagssummen der zusätzlichen Stationen und der zugehörigen Radarpixel. Diese Quotienten wurden als Korrekturfaktoren für die Radardaten verwendet. Dazu wurden die an den zusätzlichen Stationen ermittelten Korrekturfaktoren mithilfe des IDW-Verfahrens räumlich interpoliert. An den bereits vom DWD zur Aneichung genutzten Stationen ging dabei unabhängig von möglichen Abweichungen zwischen Stationsdaten und Radardaten ein Faktor von 1 in die Interpolation ein. Aus dem Ergebnis der Interpolation wurde anschließend für jeden Radarpixel der zugehörige Korrekturfaktor übernommen und die Radarniederschläge für den zuvor abgegrenzten Niederschlagszeitraum mit dem Korrekturfaktor multipliziert. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel der originalen und der angepassten Radardaten für das Einzugsgebiet der Weißen Ern. Im gezeigten Beispiel ist v. a. die zusätzlich verwendete Station Christnach von Relevanz. Für die Ereignisse in den Einzugsgebieten von Hommerich, Reisdorf und Rangendingen wurden als bestmöglicher Niederschlag die wie beschrieben angepassten RADKLIM-YW-Werte verwendet.

4.2.2 Bestmöglicher Gebietsniederschlag für das Einzugsgebiet von Kocherstetten

Für das sehr extreme Ereignis im Zwischeneinzugsgebiet von Kocherstetten bzw. des Orlacher Bachs (Gemeinde Braunsbach) haben Analysen der rohen Radardaten des DWD durch BRONSTERT et al. (2016, 2017) gezeigt, dass das Zentrum des Niederschlagsgebiets genau über dem Einzugsgebiet des

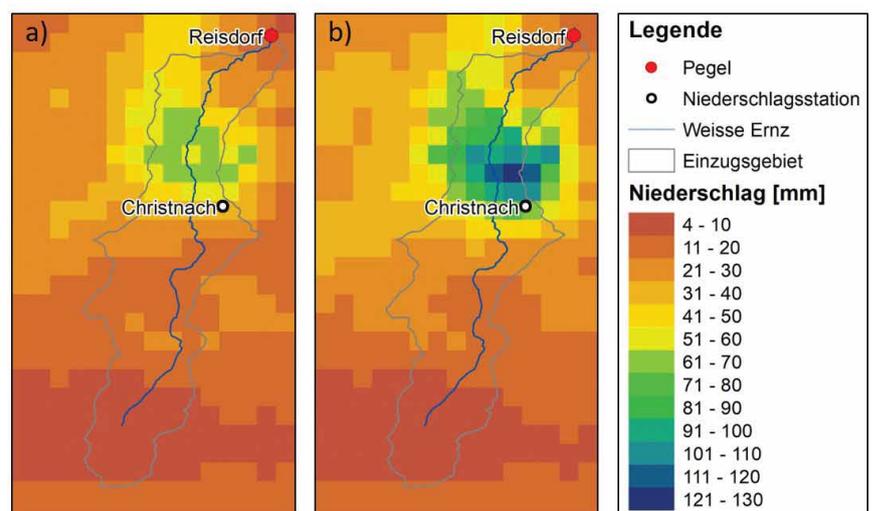


Abbildung 5

Darstellung der a) originalen und der b) zusätzlich angepassten Radardaten für das Ereignis am 22.07.2016 im Einzugsgebiet der Weißen Ern (Niederschlagssummen von 22.07.2016 18:00 Uhr bis 23.07.2016 04:00 Uhr MEZ).

Representation of the a) original and b) additionally adapted radar precipitation for the event on 07/22/2016 in the catchment of Weiße Ern (precipitation sums from 07/22/2016 18:00 until 07/23/2016 04:00 CET).

Orlacher Bachs lag und innerhalb von 75 Minuten hier ca. 120 mm (± 20 mm) Niederschlag fielen. Diese Summe wurde weder von einer Niederschlagsstation erfasst noch ist sie in den vom DWD angeeichten Radardaten enthalten. Für das Einzugsgebiet des Orlacher Bachs wurde daher ein räumlich einheitlicher Korrekturfaktor von 1,36 für die Radardaten bestimmt, der sich aus der maximalen Niederschlagssumme der Radardaten im Einzugsgebiet des Orlacher Bachs und der von BRONSTERT et al. (2016, 2017) geschätzten Niederschlagssumme ergibt (LUBW, 2019). Als bestmögliche Niederschlagsdaten für das Ereignis in Kocherstetten wurden also die um den Faktor 1,36 erhöhten RADKLIM-YW-Werte verwendet.

4.2.3 Bestmögliche Niederschlagsdaten für das Einzugsgebiet von Goppertshofen

Für das Einzugsgebiet des Pegels Goppertshofen lagen uns keine zusätzlichen Niederschlagsdaten zur Anpassung der RADKLIM-Daten vor. Für die beiden Ereignisse im Jahr 2016 stand jedoch alternativ das SuperHD-Produkt der Firma Meteologix zur Verfügung. Im vorliegenden Fall erbrachten die LARSIM-Simulationen mit SuperHD eine bessere Übereinstimmung am Pegel Goppertshofen als die Simulationen mit RADKLIM-YW. Rein auf dieser Basis wurden die SuperHD-Daten für die beiden Ereignisse im Jahr 2016 als bestmöglicher Niederschlag ausgewählt. Diese Auswahl kann jedoch nicht durch entsprechende Niederschlagsmessungen untermauert werden. Inwieweit SuperHD in den beiden Fällen den Niederschlag tatsächlich besser widerspiegelt als RADKLIM-YW oder eventuell nur LARSIM-Modellunsicherheiten ausgleicht, kann an dieser Stelle daher nicht abschließend geklärt werden. Unabhängig davon, ermöglicht der Vergleich der Ergebnisse mit den beiden Radarprodukten qualitative Aussagen zur Auswirkung der Unsicherheit der Radarniederschläge auf die Abflusssimulation.

5 Simulationsvarianten und Auswertungsmethoden

5.1 Simulationsvarianten

Für alle hier untersuchten Einzugsgebiete lagen LARSIM-Modelle vor, die gemäß des LARSIM-Kalibrierleitfadens für operationelle WHM in Stundenschritten kalibriert waren (HAAG et al., 2016). Dabei ist zu beachten, dass das hier analysierte dynamische Infiltrationsmodul physikalisch basiert ist und nicht kalibriert wurde. Die Kalibrierung erfolgte daher mit der in Kapitel 2.1 erläuterten Modellstruktur mit Stundenwerten der Stationsmessungen und unter Verwendung des Parameters A2 zur Ausweisung des schnellen Direktabflusses (Abb. 2: schwarze Struktur). Mit diesen Modellen wurden unter Verwendung der Stationsdaten die jeweiligen Anfangsbedingungen vor den Ereignissen bestimmt. Hierfür wurde über einen Zeitraum von mehreren Jahren bis zum jeweiligen Ereignisbeginn gerechnet und dann eine Zustandsdatei ausgegeben, welche die Anfangsbedingungen

für alle unten definierten Varianten bildete. Ausgehend von diesen Anfangsbedingungen wurden die in Tabelle 3 definierten Ereignisse mit unterschiedlichen Varianten berechnet. Die drei Grundvarianten unterscheiden sich dabei hinsichtlich der Modellkonfiguration, der Zeitschrittweite und der Verwendung von Stations- bzw. Radarniederschlagsdaten. Sie sind in Tabelle 4 definiert.

Variante 1 entspricht dem Modell in der Form, wie es kalibriert wurde und wie es auch standardmäßig zur Hochwasservorhersage eingesetzt wird. Variante 1 kann somit als Referenz oder Standard-Modellkonfiguration angesehen werden, die den bisherigen Ist-Zustand repräsentiert. Ausgehend vom Status Quo der Variante 1 wurden in LUBW (2019) schrittweise Veränderungen an der Modellkonfiguration vorgenommen, die eine Verkürzung der Zeitschrittweite, die Nutzung von Radar- anstelle von Stations-Niederschlägen, die Nutzung des physikalischen Infiltrationsmoduls anstelle des konzeptionellen Parameters A2 und die Anpassung des Parameters EQD2 für die Abflusskonzentration des schnellen Direktabflusses an die HOF-dominierten Ereignisse umfassten. Die Analyse dieser Varianten für insgesamt 20 Starkregenereignisse verdeutlichte, dass der Ersatz des konzeptionellen Parameters A2 durch das physikalisch basierte Infiltrationsmodul die deutlichste Wirkung auf die Simulationsergebnisse zeigte. Alle anderen Schritte bewirkten im Vergleich hierzu nur relativ geringe Änderungen (LUBW, 2019). Im Sinne einer möglichst übersichtlichen Darstellung werden im vorliegenden Artikel daher nur die Ergebnisse von drei Simulationsvarianten gezeigt. Der Vergleich von Variante 2 zu Variante 3 verdeutlicht dabei die Wirkung des für die hier durchgeführte Analyse entscheidenden Schritts, der Verwendung des neuen Infiltrationsmoduls anstelle von A2. Der Vergleich von Variante 1 mit Variante 2 fasst hingegen die Wirkung aller weiteren Schritte zusammen.

Die Varianten 2 und 3 werden mit Radarniederschlägen angetrieben und in 15-Minuten-Zeitschritten berechnet. Grundsätzlich kann LARSIM auch in kürzeren Zeitschritten von minimal 5 Minuten betrieben werden. Allerdings liegen die Abflussmessungen (mit Ausnahme von Hommerich) in einer minimalen zeitlichen Auflösung von 15 Minuten vor. Zudem wurde in LUBW (2019) gezeigt, dass die Unterschiede der Simulationsergebnisse zwischen Zeitschrittweiten von 5 und 15 Minuten recht gering sind. Als Kompromiss zwischen Anforderungen an die operationellen Daten und die zu erzielende Genauigkeit wurde daher empfohlen, zukünftige operationelle Vorhersagen lokaler Hochwasser in Folge von kleinräumigen konvektiven Starkregen in Zeitschritten von 15 Minuten zu berechnen (LUBW, 2019). Darüber hinaus wurde in den Varianten 2 und 3 nicht der in der allgemeinen Kalibrierung festgelegte Parameter EQD2 übernommen, der maßgeblich für die Abflusskonzentration des schnellen Direktabflusses ist. Vielmehr wurde in beiden Varianten ein EQD2-Wert verwendet, der visuell spezifisch an die analysierten Ereignisse angepasst

Tabelle 4
Definition der drei grundlegenden Berechnungsvarianten für die untersuchten Starkregenereignisse.
Definition of the three different simulation versions of the present study.

	Niederschlag	Zeitschritt	EQD2	A2	Infiltrationsmodul
Variante 1	Stationen	1 Stunde	allgemein	ja	nein
Variante 2	Radar	15 Minuten	angepasst	ja	nein
Variante 3	Radar	15 Minuten	angepasst	nein	ja

worden war. An den Pegeln mit zwei Ereignissen wurde dabei für beide Ereignisse derselbe EQD2-Wert verwendet.

Die Varianten 2 und 3 unterscheiden sich somit nur hinsichtlich der Bildung von schnellem Direktabfluss. In der Variante 2 wird die Menge des schnellen Direktabflusses mithilfe des kalibrierten Parameters A2 ausgewiesen, während sie in Variante 3 durch die Anwendung des (kalibrierfreien) dynamischen Infiltrationsmoduls bestimmt wird (Details siehe Kapitel 2). Dabei ist zu beachten, dass mit dem dynamischen Infiltrationsmodul lediglich Infiltrationsüberschuss und somit Horton-Oberflächenabfluss ausgewiesen wird. Oberflächenabfluss infolge von Sättigungsflächen wird in Variante 3 nicht als schneller Direktabfluss behandelt. Da hier sommerliche Starkregenereignisse mit geringer Vorfeuchte analysiert wurden, ist der Einfluss von Sättigungsflächen vermutlich gering. Dieser Aspekt muss bei der Interpretation der Ergebnisse aber berücksichtigt werden.

Um den Einfluss der Niederschlagsunsicherheit bewerten zu können, wurden die Varianten 2 und 3 darüber hinaus jeweils mit zwei unterschiedlichen Radarniederschlägen simuliert:

- a) bestmöglicher Niederschlag gemäß Kapitel 4.2
- b) unveränderte RADKLIM-YW-Daten des DWD (siehe Kapitel 4.1).

Somit ergeben sich für die Ereignisse jeweils fünf unterschiedliche Modellläufe mit Variante 1, Variante 2 a), Variante 3 a), Variante 2 b) und Variante 3 b).

5.2 Auswertungsmethoden

Die Simulationsvarianten wurden zum einen auf Basis des visuellen Vergleichs zwischen simulierten und gemessenen Ganglinien an den betrachteten Pegeln qualitativ bewertet. Zum anderen wurden die Scheitelwerte sowie die Abflussvolumina der Ereignisse als Grundlage für eine quantitative Bewertung herangezogen. Für die Ermittlung des ereignisspezifischen Abflussvolumens wurde bewusst ein sehr einfacher und leicht nachvollziehbarer Ansatz gewählt: Für alle Ganglinien wurde das Volumen bestimmt, das während des (unten dargestellten) ereignisspezifischen Auswertungszeitraums oberhalb des jeweiligen MQ-Werts liegt.

Bei der quantitativen Bewertung von Abflussscheiteln und -volumina besteht das Problem, dass diese auf der Seite minimaler Werte (linksseitig) durch Null begrenzt sind, die maximalen Werte (rechtsseitig) aber unendlich hoch werden können. Daher besteht die Tendenz, dass Modelle mit systematischer Unterschätzung durch gewöhnliche differenzielle Fehlermaße wie die absolute oder die relative Abweichung besser bewertet werden als Modelle mit einer systematischen Überschätzung (HELSEL & HIRSCH, 2002). Zur Analyse der Abweichungen wurde in der vorliegenden Studie daher ein multiplikativer Fehler (MF) in Anlehnung an den "mean multiplicative error" von MOOG & JIRKA (1998) wie folgt berechnet:

$$MF = \frac{sim}{mes} \quad \text{für: } sim \geq mes \quad (13a)$$

$$MF = -\frac{mes}{sim} \quad \text{für: } sim < mes \quad (13b)$$

mit:

MF []	multiplikatives Fehlermaß
sim [m ³ /s], [mm]	Simulationsergebnis (Scheitelwert bzw. Abflussvolumen)
mes [m ³ /s], [mm]	Messung (Scheitelwert bzw. Abflussvolumen)

Der Wertebereich des Fehlermaßes reicht von +1 bis +∞ sowie von -1 bis -∞, der Bereich zwischen -1 und +1 ist nicht definiert. Eine perfekte Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung wird durch einen Wert von +1 oder -1 repräsentiert. Eine Überschätzung um das Doppelte wird durch den Wert 2 und eine Unterschätzung um die Hälfte durch den Wert -2 charakterisiert.

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Einfluss der Modellkonfiguration

Hier wird zunächst die bisherige Standard-Modellkonfiguration (Variante 1: Berechnungsschrittweite = 1 h, Stationsdaten des Niederschlags, keine Nutzung des neuen Infiltrationsmoduls) mit den Varianten 2 a) und 3 a) verglichen. In den Varianten 2 a) und 3 a) erfolgt die Simulation jeweils in Zeitschritten von 15 Minuten, mit einem angepassten EQD2-Wert unter Verwendung der bestmöglichen Radarniederschläge. Die beiden Varianten unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Nutzung des neuen Infiltrationsmoduls: In Variante 2 a) wird das neue Infiltrationsmodul nicht verwendet, die Bildung von schnellem Direktabfluss erfolgt wie in Variante 1 über den Parameter A2. In Variante 3 a) ist die Wirkung von A2 deaktiviert, die Bildung von schnellem Direktabfluss (= HOF) erfolgt ausschließlich über das dynamische Infiltrationsmodul. In Abbildung 6 werden die simulierten Ganglinien der drei Varianten mit den Abflussmessungen verglichen. Zusätzlich sind die Summenkurven der Stationsniederschläge (Variante 1) und der bestmöglichen Radarniederschläge (Varianten 2 a) und 3 a)) dargestellt.

Aus Abbildung 6 wird deutlich, dass der kumulierte Stationsniederschlag bei den Ereignissen in Rangendingen, Reisdorf 2018 und Hommerich klar höher ist als der bestmögliche Radarniederschlag. Beim Ereignis in Rangendingen lag eine Station genau im Zentrum der auslösenden Niederschlagszelle. Die an dieser Station gemessenen sehr hohen Niederschlagssummen und -intensitäten wurden durch das LARSIM-interne Interpolationsverfahren auf eine große Fläche extrapoliert. Entsprechend fällt der aus den Stationsdaten ermittelte Niederschlag höher aus als der bestmögliche Radarniederschlag (LUBW, 2020). Für Hommerich und Reisdorf 2018 liegen ähnliche Phänomene vor. Lediglich im Falle von Kocherstetten und Reisdorf 2016 ist umgekehrt der aus den Stationsdaten abgeleitete Gebietsniederschlag merklich geringer als der bestmögliche Radarniederschlag. Im Einklang mit den Ergebnissen in LUBW (2020) wird also deutlich, dass mit Stationsdaten die Gebietsniederschläge bei Starkregen je nach Lage von Stationen und Niederschlagszellen sowohl unter- wie auch überschätzt werden können.

Obwohl der Gebietsniederschlag aus den Stationsdaten häufig höher ist als der bestmögliche Radarniederschlag, wird die Abflussreaktion auf das Starkregenereignis in der Variante 1 in allen Fällen, außer am Pegel Rangendingen, klar unterschätzt (Abb. 6). Die systematische Unterschätzung der Gebietsantwort auf Starkregen in Variante 1 lässt sich also nicht auf eine systematische Unterschätzung des Niederschlagsinputs zurückführen, sondern ist offensichtlich modelltechnisch bedingt. Da die Intensitätskon-

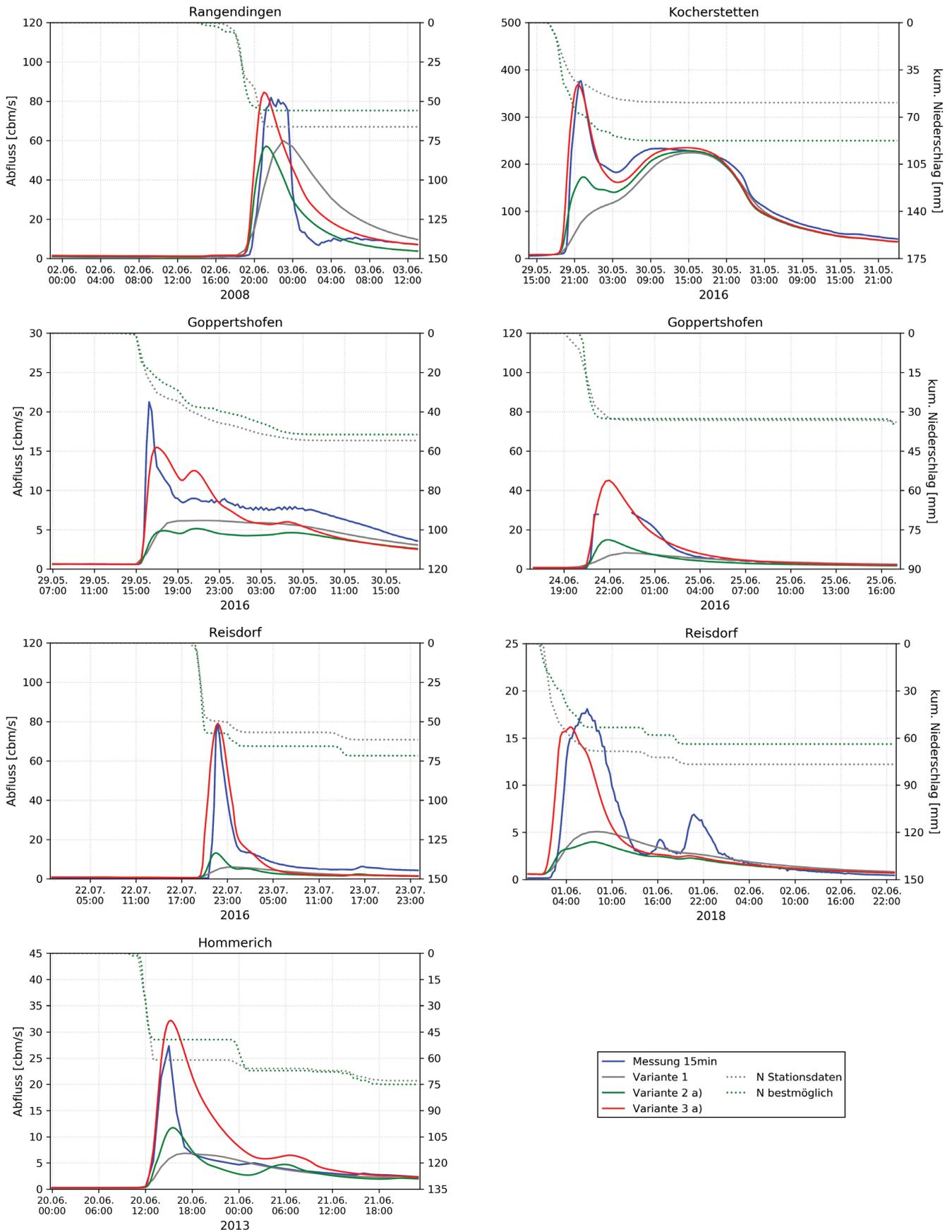


Abbildung 6

Gangliniendarstellungen der gemessenen Abflüsse im Vergleich mit den simulierten Abflüssen der Varianten 1, 2 a) und 3 a).
 Hydrographs of measured discharge in comparison with simulated discharge of versions 1, 2 a) and 3 a).

trollierte Abflussreaktion bei Starkregen durch den in der Standardkonfiguration verwendeten Speicheransatz für den Boden naturgemäß nicht abgebildet werden kann, entspricht dieses Ergebnis den Erwartungen und bisherigen Erfahrungen mit der Standardkonfiguration bei Starkregen auf zuvor trockenen Boden. Es verdeutlicht somit nochmals, weshalb die hier dargestellten Weiterentwicklungen durchgeführt wurden.

Mit der Variante 2 a) ergeben sich im Allgemeinen nur geringe Veränderungen gegenüber der Variante 1, da auch hier der Großteil des Niederschlags in den Boden aufgenommen wird und somit nicht (schnell) zum Abfluss kommt. Die Verkürzung des Zeitschritts auf 15 Minuten, die Berücksichtigung des bestmöglichen Radarniederschlags und die Verwendung des spezifischen EQD2-Werts haben in Summe nur einen verhältnismäßig geringen Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Auch mit der Variante 2 a) wird die Abflussreaktion auf das Starkregenereignis (außer im Falle von Rangendingen) weiterhin stark unterschätzt (Abb. 6).

Erst durch die Aktivierung des dynamischen Infiltrationsmoduls in Variante 3 a) ergibt sich eine deutliche Verstärkung der Abflussreaktion. Das Infiltrationsmodul simuliert also bei allen hier untersuchten Starkregenereignissen signifikante Mengen an Infiltrationsüberschuss bzw. HOF (schneller Direktabfluss). Der über das physikalisch basierte Infiltrationsmodul generierte schnelle Direktabfluss (= HOF) ist dabei deutlich höher als in der ansonsten gleichen Modellvariante 2 a) mit dem Parameter A2. Bei der weiteren Interpretation ist jedoch zu berücksichtigen, dass lediglich das maßgebliche Abflussvolumen auf dem kalibrierten dynamischen Infiltrationsmodul beruht, während die Abflusskonzentration des schnellen Direktabflusses durch die Anpassung des Parameters EQD2 visuell optimiert wurde. In den Varianten 2 a) und 3 a) wurden dabei dieselben EQD2-Werte verwendet, sodass diese beiden Varianten auch hinsichtlich der Abflusskonzentration unmittelbar vergleichbar sind. Mit Variante 3 a) wird die grundlegende Abflussreaktion für alle sieben Ereignisse zufriedenstellend bis gut wiedergegeben. Dabei sind die Ergebnisse in sechs der sieben Fälle eindeutig besser als in der Variante 2 a). Wie Abbildung 6 verdeutlicht, hätte für diese sechs Ereignisse auch durch die Wahl eines anderen Wertes für EQD2 keine bessere Anpassung der Variante 2 a) erreicht werden können, da das Volumen des dadurch beeinflussten schnellen Direktabflusses viel zu gering ist. Lediglich im Fall von Rangendingen hätte durch die Wahl eines anderen EQD2-Wertes mit der Variante 2 a) eine ähnlich gute visuelle Übereinstimmung erzielt werden können wie mit der Variante 3 a) (Abb. 6).

Neben den qualitativen Vergleichen anhand der Ganglinien werden die Ergebnisse auch quantitativ anhand der Scheitelabflüsse und der Abflussvolumina verglichen. Hierfür sind die multiplikativen Fehler MF (aller fünf Varianten) für die Scheitel in Abbildung 7 und für die Volumina in Abbildung 8 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass das Ereignis Goppertshofen Juni 2016 nicht für die quantitative Auswertung verwendet werden

konnte, da für dieses Ereignis keine durchgehende, gemessene Abflussganglinie vorliegt.

Abbildung 7 verdeutlicht nochmals, dass sowohl in der Standardkonfiguration der Variante 1 wie auch in der Variante 2 a) eine systematische Unterschätzung der beobachteten Scheitelabflüsse vorliegt. Im extremsten Fall (Variante 1 für Reisdorf 2016) beträgt der simulierte Scheitelabfluss weniger als 1/13 der Messung. In den meisten anderen Fällen der Varianten 1 und 2 a) liegen die simulierten Scheitel im Bereich von nur ca. 1/6 bis 1/3 der gemessenen Scheitel. Lediglich für die Pegel Rangendingen und Kocherstetten sind die Unterschätzungen der Scheitel mit MF von ca. -1,7 bis -1,4 geringer. Für den Pegel Kocherstetten am Kocher ist aber zu beachten, dass der simulierte Scheitel nicht bei der ersten starkregeninduzierten Welle auftritt, sondern bei der zweiten Welle, die aus dem oberstromigen Einzugsgebiet stammt (Abb. 6). Wenn man nur die für die Reaktion auf das Starkregenereignis relevante erste Welle zur Auswertung heranziehen würde, ergäben sich für Kocherstetten MF von -3,7 für die Variante 1 bzw. -2,2 für Variante 2 a).

Für die Variante 3 a), in der das Infiltrationsmodul genutzt wird, ergeben sich hingegen sowohl positive wie auch negative MF für die Scheitel. Dabei liegen sowohl die Überschätzungen wie auch die Unterschätzungen nahe bei +1 bzw. -1 (Wertebereich: -1,37 für Goppersthofen Mai 2016 bis +1,18 für Hommerich; Abb. 7).

Die quantitative Auswertung der Scheitel untermauert also die Erkenntnisse aus der visuellen Ganglinienanalyse. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die simulierten Scheitelabflüsse auch durch die kalibrierten Werte des Parameters EQD2 beeinflusst werden. Daher wird im Folgenden das Abflussvolumen als weiteres Kriterium herangezogen. Der Parameter EQD2 beeinflusst die Dynamik des schnellen Direktabflusses, nicht aber die Dynamik der drei anderen, langsameren Abflusskomponenten. In allen hier vorliegenden Fällen kommt der ereignisspezifische schnelle Direktabfluss während des Auswertungszeitraums vollständig zum Abfluss. Folglich sind die ermittelten Abflussvolumina un-

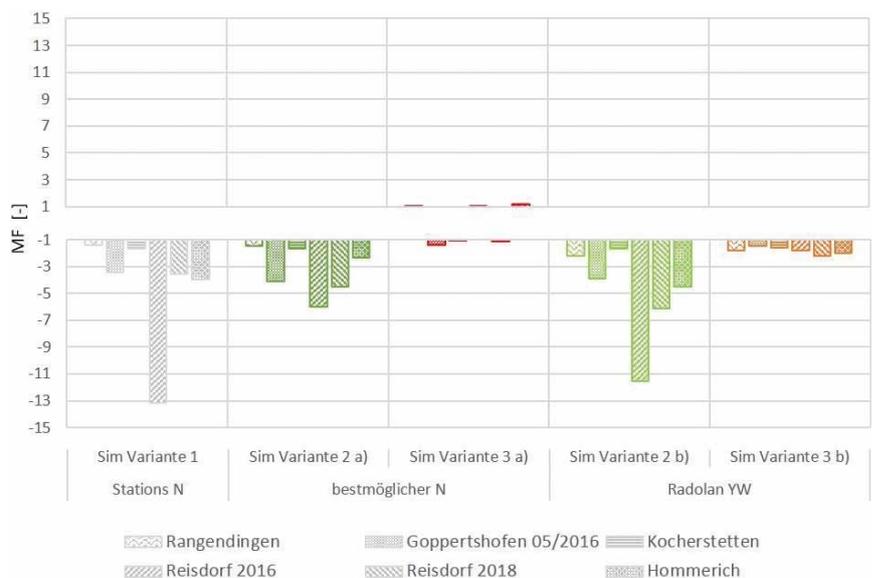


Abbildung 7
Multiplikative Fehler MF der Scheitelabflüsse der Simulationsvarianten.
Multiplicative errors MF of the peak discharges of the simulation versions.

abhängig von EQD2, wodurch die Volumenauswertung einen objektiven Vergleich der Varianten sicherstellt.

Abbildung 8 zeigt, dass auch die Abflussvolumina der Ereignisse mit den Varianten 1 und 2 a) systematisch unterschätzt werden. Nur für den Pegel Rangendingen ergibt sich in der Variante 1 eine Überschätzung des Abflussvolumens, was vermutlich auf die oben erläuterte Überschätzung des Gebietsniederschlags durch die Stationsdaten zurückzuführen ist (LUBW, 2020). In der Variante 3 a) mit dynamischem Infiltrationsmodul ergeben sich hingegen gleichermaßen Unter- und Überschätzungen des Abflussvolumens. Die MF liegen dabei im Allgemeinen nahe bei +1 bzw. -1, wobei die größte Fehleinschätzung für den Pegel Hommerich mit einer Überschätzung um das 1,64-fache auftritt.

Beim Volumen sind die systematischen Fehler der Varianten 1 und 2 a) erwartungsgemäß geringer als bei den Scheiteln, da für den Scheitel nicht nur die Abflussmenge ausschlaggebend ist, sondern auch die Aufteilung in unterschiedlich dynamisch reagierende Abflusskomponenten. In den Varianten 1 und 2 a) wird im Vergleich zur Variante 3 a) zu wenig des sehr dynamisch reagierenden schnellen Direktabflusses gebildet. Daher kann eine moderate Unterschätzung des Abflussvolumens in den Varianten 1 und 2 a) eine drastische Unterschätzung des Scheitels erzeugen. Aber selbst wenn man diesen Aspekt der Aufteilung in unterschiedlich schnell reagierende Abflusskomponenten außer Acht lässt und nur das Abflussvolumen als Kriterium heranzieht, sind die Ergebnisse der Variante 3 a) eindeutig besser als die der Variante 1 und der direkt vergleichbaren Variante 2 a) (Abb. 8).

Mit den LARSIM-Modellen mit dynamischem Infiltrationsmodul können die hier untersuchten starkregenbedingten Hochwasser bei Verwendung des bestmöglichen Radarniederschlags somit insgesamt gut abgebildet werden. Die Vergleiche der Modellkonfigurationen verdeutlichen, dass die Berücksichtigung der dynamischen Infiltration dabei der entscheidende Faktor ist, um die Abflussreaktion auf Starkregenereignisse adäquat abbilden zu können.

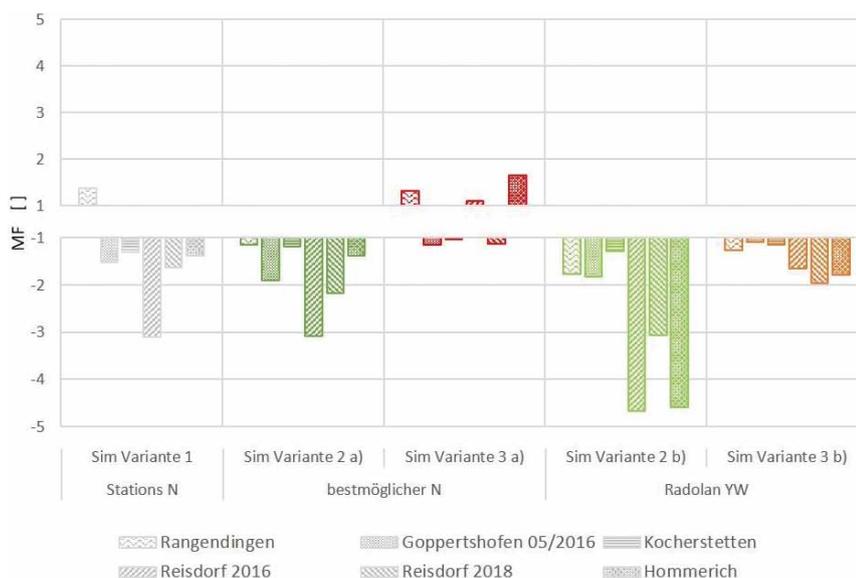


Abbildung 8
Multiplikative Fehler MF der Abflussvolumina der Simulationsvarianten.
Multiplicative errors MF of the discharge volumes of the simulation versions.

6.2 Einfluss des Niederschlagsinputs

In diesem Abschnitt werden die bereits zuvor analysierten Varianten 2 a) und 3 a) (bestmöglicher Radarniederschlag) zusätzlich mit den Varianten 2 b) und 3 b) verglichen, die jeweils mit den unveränderten Niederschlagswerten aus RADKLIM-YW berechnet wurden. Die jeweiligen a)- und b)-Varianten unterscheiden sich somit nur hinsichtlich des verwendeten Niederschlagsinputs. In Abbildung 9 werden die simulierten Ganglinien der vier Varianten mit den Messungen verglichen. Zusätzlich sind die Summenkurven der Niederschläge des bestmöglichen Radarniederschlags (Varianten 2 a) und 3 a)) und des hier nicht weiter angepassten RADKLIM-YW-Niederschlags (Varianten 2 b) und 3 b)) dargestellt.

Bei den beiden Ereignissen in Goppertshofen wurden für die bestmögliche Abbildung des Niederschlags die SuperHD-Daten der Firma Meteorogix verwendet (Kapitel 4.2.3). Für Goppertshofen Juni 2016 zeigen beide Radarprodukte einen ähnlichen zeitlichen Verlauf. Die Summe des Gebietsniederschlags ist bei RADKLIM-YW aber ca. 35 % höher als bei SuperHD. Für Goppertshofen Mai 2016 sind die Niederschlagssummen der beiden Radarprodukte ähnlich, sie zeigen aber deutliche Unterschiede im zeitlichen Verlauf. Gemäß den Ergebnissen in LUBW (2019) und (2020) sind die hier für Goppertshofen festgestellten Unterschiede zwischen den beiden Radarprodukten in einer typischen Größenordnung, wie sie auch für andere Ereignisse immer wieder auftreten. Die Unterschiede hinsichtlich der Niederschlagsmenge sind dabei jedoch nicht systematisch, vielmehr kann in einem Fall RADKLIM-YW mehr Niederschlag liefern und in einem anderen SuperHD. Ebenso liefern die Abflusssimulationen für manche Ereignisse mit SuperHD bessere Ergebnisse und für andere mit RADKLIM-YW (LUBW, 2020).

Bei allen anderen hier untersuchten Ereignissen stellt der bestmögliche Niederschlag eine im Rahmen dieser Studie durchgeführte Korrektur der RADKLIM-YW-Daten dar (Kapitel 4.2.1). Diese Korrektur führte bei allen hier untersuchten Ereignissen zu einer Erhöhung des Gebietsniederschlags um minimal 20 % (Reisdorf 2018) bis zu maximal 67 % (Hommerich). Auch hier ist jedoch darauf hinzuweisen, dass in LUBW (2019) auch mehrere umgekehrte Fälle identifiziert wurden, in denen die RADKLIM-YW-Niederschläge im Vergleich zu Stationsdaten (die dem DWD nicht zur Anreichung zur Verfügung standen) deutlich zu hoch waren. Es kann also nicht grundsätzlich von einer systematischen Unterschätzung der RADKLIM-YW-Niederschläge ausgegangen werden.

Insgesamt liegen die Unterschiede zwischen den bestmöglichen Radarniederschlägen und den RADKLIM-YW-Niederschlägen in dem Bereich der von uns bislang häufig vorgefundenen Abweichungen zwischen unterschiedlichen Radarprodukten (LUBW, 2019; 2020). Daher gehen wir davon aus, dass die hier analysierten Unterschiede charakteristisch für die häufig vorzufindende Unsicherheit von Radarniederschlägen sind. Der Vergleich zwischen den Varianten 3 a) und 3 b) erlaubt damit Aussagen über den typischen

Einfluss der Niederschlagsunsicherheit auf die simulierte Abflussreaktion starkregeninduzierter Ereignisse.

Abbildung 9 verdeutlicht, dass diese typische Unsicherheit des Radarniederschlags eine erhebliche Unsicherheit für die simulierte Abflussreaktion zur Folge hat. Infolge der veränderten Niederschläge ergeben sich im Vergleich zwischen den Varianten 3 a) und 3 b) Unterschiede in den Scheitelabflüssen zwischen -58 % (Hommerich) und +86 % (Goppertshofen Juni 2016). Dies lässt sich wiederum besser als multiplikative Abweichung analog zum MF ausdrücken. Die Abweichungsfaktoren zwischen den beiden Varianten liegen zwischen 1,1 für Goppertshofen Mai 2016 und 2,4 für Hommerich. Der mittlere Abweichungsfaktor zwischen Variante 3 a) und 3 b) für alle sieben Ereignisse liegt bei 1,8. Das heißt, die hier zugrunde gelegte Unsicherheit des radarbasierten Starkregenniederschlags resultiert in einem mittleren Unsicherheitsfaktor von 1,8 für den simulierten Abflussscheitel. Auf Basis der sieben hier analysierten Ereignisse erscheint es also plausibel, dass der für ein Starkregenereignis simulierte Scheitelabfluss alleine aufgrund der Unsicherheit des Radarniederschlags typischerweise grob im Bereich einer Unterschätzung um die Hälfte und einer Überschätzung um das Doppelte liegt (Unsicherheitsfaktor ~ 2).

Die Unterschiede zwischen den Varianten 2 a) und 3 a), die durch die Modellkonfiguration bedingt sind, sind meist größer als die niederschlagsbedingten Unterschiede zwischen 3 a) und 3 b) (Abb. 9). Die multiplikativen Abweichungsfaktoren für den Vergleich der simulierten Scheitel der Varianten 2 a) und 3 a) liegen dabei zwischen 1,5 für Rangendingen und 6,0 für Reisdorf 2016. Der mittlere Abweichungsfaktor zwischen den Scheiteln der Varianten 2 a) und 3 a) beträgt 3,1 und ist damit deutlich größer als der mittlere Abweichungsfaktor von 1,8 zwischen 3 a) und 3 b). Dies unterstreicht nochmals die Bedeutung der Modellverbesserung auch im Vergleich zu der verbleibenden Unsicherheit durch den Niederschlagsinput.

Der Vergleich der Ganglinien für die Varianten 2 b) und 3 b) zeigt, dass das dynamische Infiltrationsmodul (Variante 3 b)) auch bei Nutzung der unveränderten RADKLIM-YW-Niederschläge in der Regel zu einer Verbesserung der Simulationsergebnisse führt (Abb. 9). Dies wird auch durch die quantitative Auswertung der multiplikativen Fehler für die Scheitelabflüsse und die Abflussvolumina bestätigt (Abb. 7 und 8). Die bei Verwendung von RADKLIM-YW in der Variante 2 b) teils drastischen Unterschätzungen der Scheitel mit einem mittleren MF von -5,0 werden in der Variante 3 b) mit einem mittleren MF von -1,8 deutlich reduziert (Abb. 7). Ähnliches gilt auch für die Abflussvolumina, für die der mittlere MF von -2,9 in Variante 2 b) auf -1,5 in Variante 3 b) reduziert wird (Abb. 8). Die Ergebnisse unterstreichen also, dass die Einführung des dynamischen Infiltrationsmoduls auch bei unsicherem Niederschlagsinput zu einer klaren Verbesserung bei der Simulation starkregeninduzierter Abflüsse mit LARSIM führt.

6.3 Anwendungsbereiche des weiterentwickelten Modells

Fluviale Hochwasser, die in der Folge langanhaltender, ergiebiger Niederschläge und möglicherweise hoher Vorsättigung des Einzugsgebiets auftreten, werden mit der bislang genutzten Standardkonfiguration (Variante 1) gut abgebildet. Für diese fluvialen Hochwasser haben sich der einfache konzeptionelle Ansatz mit einer Kombination aus der Bodenfeuchte-Sättigungsflächenfunktion BSF und A2 sowie eine Zeitschrittweite von einer

Stunde bewährt. Ergänzend steht LARSIM nun auch in der hier vorgestellten, um das Infiltrationsmodul erweiterten Konfiguration zur Verfügung (Variante 3). Damit können lokale, starkregenbedingte Hochwasser simuliert und vorhergesagt werden, die durch Infiltrationsüberschuss und Horton-Oberflächenabfluss dominiert sind. Allerdings reagiert die Variante 3 im Vergleich zu Variante 1 sehr sensitiv auf den Niederschlagsinput (Abb. 9), der insbesondere bei längerfristigen meteorologischen Vorhersagen hinsichtlich Menge und Intensität sehr unsicher ist. Zudem ist auch bei kurzfristigen meteorologischen Vorhersagen die exakte Lage eines Starkregen-Niederschlagsfelds mit erheblicher Unsicherheit behaftet, was wiederum Auswirkungen darauf hat, für welches Gewässer ein starkregenbedingtes, lokales Hochwasser vorhergesagt wird (CECINATI et al., 2017; LUBW, 2020).

Vor diesem Hintergrund wird für die operationelle Vorhersage fluvialer Hochwasser und deren zeitlichen Verlauf weiterhin die bewährte Variante 1 mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde verwendet. Parallel kann zukünftig die Variante 3 mit Infiltrationsmodul und einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten verwendet werden, um damit pluviale Hochwasser in der Folge von lokalem Starkregen besser vorherzusagen. Aufgrund der Unsicherheiten bei der Intensität und räumlichen Zuordnung der vorhergesagten Niederschläge sollten die Vorhersagen lokaler starkregenbedingter Hochwasser jedoch generalisiert und in eine regionale Warninformation überführt werden.

Die dargestellten Weiterentwicklungen und Analysen zielen vor allem auf eine verbesserte Simulation und Vorhersage von starkregeninduzierten Hochwassern ab. Folglich haben sich die Betrachtungen bislang auf die Abflüsse an Pegeln bzw. in Gewässern konzentriert. Insbesondere durch die räumlich sehr hoch aufgelöste UTGB-spezifische Berechnung des Infiltrationsüberschusses und des daraus resultierenden HOF ergeben sich aber auch weitere Anwendungsmöglichkeiten vor allem für den flächendifferenziert ermittelten Infiltrationsüberschuss.

Im Zusammenhang mit Starkregengefahrenkarten kann der durch LARSIM je UTGB (Hydrotop) ermittelte Infiltrationsüberschuss z. B. analog zum Vorgehen mit RoGeR in Baden-Württemberg als Eingangsgröße für detaillierte hydraulische Berechnungen des außerhalb der Gewässerläufe wild abfließenden Oberflächenabflusses genutzt werden (LUBW, 2016), wobei die räumliche Auflösung bei RoGeR aber noch deutlich höher ist als die der UTGB in LARSIM.

Auch bei der großräumigen Stoffeintragsmodellierung, bei der LARSIM bereits als hydrologische Grundlage für die Berechnung diffuser Stoffeinträge genutzt wird (LUBW, 2017; KRUMM et al., 2020), ergeben sich deutliche Verbesserungen. Für diffuse Stoffeinträge ist häufig der Oberflächenabfluss infolge von Infiltrationsüberschuss auf landwirtschaftlichen Flächen von entscheidender Bedeutung. Durch den HOF, der bei kurzzeitigen, intensiven Ereignissen entsteht, können über Erosion und Abschwemmung so große Mengen partikulärer bzw. gelöster Nähr- und Schadstoffe in die Gewässer eingetragen werden, dass die kurzzeitigen Ereignisse häufig maßgeblich für die langjährige Eintragsbilanz sind (LAZAROTTO et al., 2005; TANG et al., 2012; HAHN et al., 2013). Auch für eine langjährige mittlere Bilanzierung ist es daher erforderlich, den Oberflächenabfluss bei solchen sporadisch auftretenden, kurzzeitigen Ereignissen möglichst exakt einzubeziehen. Hierfür können die bislang bereits

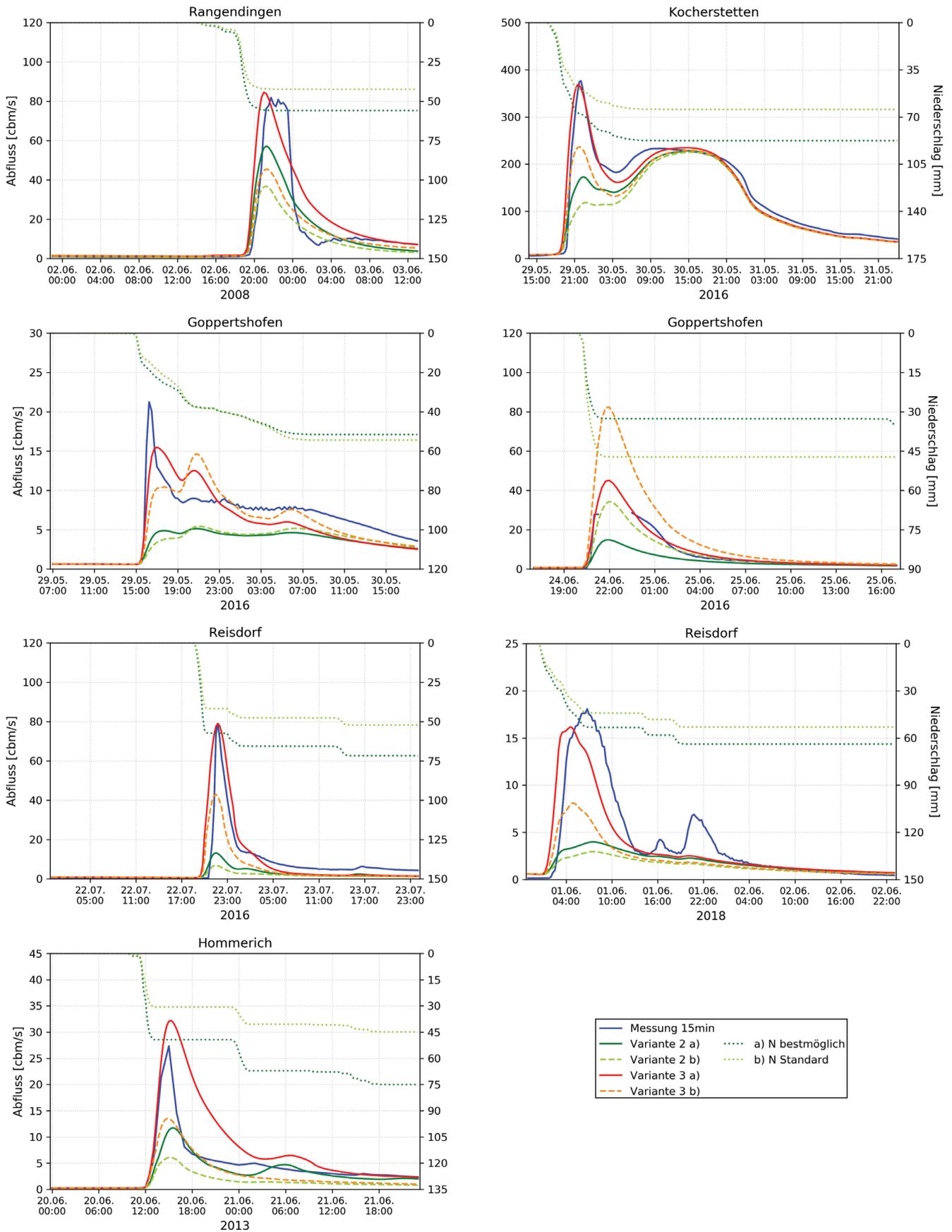


Abbildung 9
 Gangliniendarstellungen der gemessenen Abflüsse im Vergleich mit den simulierten Abflüssen der Varianten 2 a), 2 b), 3 a) und 3 b).
 Hydrographs of measured discharge in comparison with simulated discharge of versions 2 a), 2 b), 3 a) and 3 b).

bei der Stoffeintragsmodellierung verwendeten langjährigen LARSIM-Wasserhaushaltssimulationen nun durch ereignisspezifische Betrachtungen ergänzt werden. Dabei werden Zeiträume mit hohen Niederschlagsintensitäten separat in kurzen Berechnungszeitschritten von 5 oder 15 Minuten unter Nutzung von Radarniederschlägen mit dynamischer Infiltration (Variante 3) simuliert. Für diese Ereignisse liegt dann der simulierte HOF räumlich sehr hoch aufgelöst für jedes UTGB (Hydrotop) vor, sodass er räumlich differenziert je Landnutzung quantifiziert werden kann. Der so ermittelte landnutzungsspezifische HOF kann zur Quantifizierung der diffusen Stoffeinträge über Oberflächenabflusspfade (Abschwemmung, Erosion) genutzt werden (AGE, 2021). Durch eine geeignete Anwendung des dynamischen Infiltrationsmoduls werden somit auch die mit LARSIM ermittelbaren hydrologischen Grundlagen für eine großräumige Stoffeintragsmodellierung deutlich verbessert (KRUMM et al., 2020).

6.4 Defizite und Verbesserungspotenziale

Die Varianten 3 a) und 3 b) wurden mit dynamischem Infiltrationsmodul und ohne den Parameter A2 berechnet. Der schnelle Direktabfluss wird daher nur durch Infiltrationsüberschuss gebildet und repräsentiert ausschließlich Horton-Oberflächenabfluss (HOF). Der mögliche Beitrag von Sättigungsflächen-Oberflächenabfluss (SOF) wird in der Variante 3 mit der zweitschnellsten Abflusskomponente, dem langsamen Direktabfluss, abgeführt (Abb. 2). Bei den hier untersuchten Ereignissen handelt es sich um intensive sommerliche Starkregen bei geringen Vorfeuchten, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass sie durch Infiltrationsüberschuss und HOF dominiert wurden. Entsprechend können diese pluvialen Ereignisse trotz der genannten Einschränkung mit der Variante 3 a) gut simuliert werden. Folglich kann die Variante 3 wie oben beschrieben zur Vorhersage starkregenbedingter lokaler Hochwasser genutzt werden. Sonstige Hochwasser, die in der Regel durch die allmählich zunehmende Sättigung der Böden im Einzugsgebiet und die damit verbundene Aktivierung von lateralen unterirdischen Fließwegen und Sättigungsflächen dominiert werden, können hingegen mit dem einfachen konzeptionellen Ansatz der Variante 1 gut simuliert und vorhergesagt werden. Darüber hinaus gibt es jedoch auch Hochwasser, die aus einer Kombination von intensitätsbedingtem HOF und sättigungsbedingten Abflusskomponenten resultieren. Für solche Ereignisse wäre es wünschenswert, die Modellkonfigurationen der Varianten 1 und 3 zu kombinieren. Eine einfache Kombination des physikalischen Infiltrationsmoduls mit dem konzeptionellen Schwellenwert-Ansatz mit A2 ist jedoch kritisch zu sehen, da die gleichzeitige Nutzung des Infiltrationsmoduls und des kalibrierten Schwellenwerts A2 zu einer Überschätzung der Abflussreaktion führen würde (LUBW, 2019). Vor diesem Hintergrund ist also eine schlüssigere Kombination der Ansätze für Infiltrationsüberschuss und sättigungsbedingte Abflussreaktionen anzustreben. Hierzu sollte zukünftig auch die sättigungsbedingte Abflussbildung möglichst physikalisch basiert abgebildet werden. Für eine Nutzung im operationellen Vorhersagemodell LARSIM muss ein solches, physikalisch basiertes Modul jedoch genauso wie das Infiltrationsmodul durch großräumig verfügbare Daten zuverlässig parametrisierbar sein und es muss für die Echtzeit-Vorhersage zugleich sehr recheneffizient sein.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zudem zu beachten, dass das in Variante 3 erfolgreich angewandte kalibrierfreie Infiltrationsmodul nur die Menge des Infiltrationsüberschusses

und des daraus resultierenden HOF liefert, der in LARSIM als schneller Direktabfluss über die Abflusskonzentration in die Gewässer abgeführt wird. Die Abflusskonzentration des schnellen Direktabflusses wird über einen zu kalibrierenden Parameter (EQD2) bestimmt. Somit hängen Geschwindigkeit und Scheitel eines HOF-dominierten Ereignisses neben dem Infiltrationsmodul auch von diesem Kalibrierparameter ab. Mit einer herkömmlichen Modellkalibrierung, bei der im Kalibrierzeitraum kein HOF-dominiertes Ereignis vorliegt, lässt sich EQD2 nur schwer anpassen (HAAG et al., 2016). Um möglichst zuverlässige Vorhersagen für Hochwasser in Folge lokaler Starkregen auch für solche Gebiete zu ermöglichen, in denen bislang noch kein HOF-dominiertes Ereignis zur Kalibrierung der Abflusskonzentration aufgetreten ist, wäre es daher wünschenswert, zukünftig die Abflusskonzentration des Oberflächenabflusses mithilfe eines kalibrierfreien Verfahrens (vorab) verlässlich festzulegen.

In diesem Zusammenhang ist auch darauf hinzuweisen, dass das Infiltrationsmodul nur den Infiltrationsüberschuss für das jeweilige UTGB (Hydrotop) berechnet. Bislang nicht berücksichtigt werden in LARSIM aber der Rückhalt in der Fläche sowie eine mögliche Infiltration des Oberflächenabflusses auf dem Weg in die Gerinne (also bei der Abflusskonzentration). In der vorliegenden Studie wurden überwiegend extreme Starkregen analysiert, bei denen der Rückhalt in der Fläche und eine mögliche Infiltration auf dem Fließweg hinsichtlich des sehr großen Gesamtabflusses relativ gesehen wahrscheinlich unbedeutend sind. Bei kleineren Ereignissen kann der Einfluss der genannten Prozesse jedoch deutlicher sichtbar werden. Dies ist möglicherweise auch eine Erklärung dafür, weshalb das im Vergleich zu den anderen hier untersuchten Ereignissen relativ kleine Hochwasser am Pegel Hommerich (HQ5) in der Variante 3 a) überschätzt wurde. Für eine weitere Verbesserung mit Blick auf die Starkregen-Problematik sollten gemeinsam mit einem kalibrierfreien Verfahren zur Abflusskonzentration von HOF zukünftig auch der Rückhalt an der Geländeoberfläche sowie die mögliche Infiltration auf dem Fließweg im Modell berücksichtigt werden. Hierdurch sind weitere Verbesserungen vor allem bei der Simulation lokaler Hochwasser infolge kleinerer Starkregenereignisse zu erwarten.

7. Folgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Studie wird dargestellt, wie das physikalisch basierte Infiltrationsmodul des Forschungsmodells RoGer in das WHM LARSIM überführt wurde und wie das Modul anhand großräumig verfügbarer Boden- und Landnutzungsdaten in unterschiedlichen Gebieten parametrisiert werden kann. Die Wirksamkeit der Weiterentwicklung und der auf unterschiedlichen Datengrundlagen basierenden Parametrisierung wird anhand von sieben Starkregenereignissen in fünf verschiedenen Einzugsgebieten in Baden-Württemberg, Luxemburg und Nordrhein-Westfalen erfolgreich getestet.

Die hier vorgenommenen Auswertungen zeigen, dass bei ausreichend hoher Güte des Niederschlags die Abflussreaktion der Einzugsgebiete auf extreme sommerliche Starkregen mit dem weiterentwickelten Modell gut nachvollzogen wird. Sie stehen damit im Einklang mit Analysen, die für insgesamt 46 weitere Ereignisse in 24 unterschiedlichen Einzugsgebieten mit RoGer bzw. LARSIM in Baden-Württemberg bereits durchgeführt wurden (STEINBRICH et al., 2016; HAAG et al., 2019). In Zusammenarbeit mit diesen bereits vorliegenden Ergebnissen kann also da-

von ausgegangen werden, dass die relevanten Prozesse mit dem aus RoGeR übernommenen dynamischen Infiltrationsmodul ausreichend gut abgebildet werden und die vorgestellte einfache Parametrisierung des Moduls in den meisten Fällen erfolgreich ist. Die hier dargestellten Ergebnisse für Luxemburg und NRW legen zudem nahe, dass die Parametrisierungsstrategie auch auf Gebiete mit anderer Datengrundlage übertragen werden kann.

Damit ist eine wichtige Grundlage für die Nutzung des Modells LARSIM in der operationellen Vorhersage starkregenbedingter lokaler Hochwasser geschaffen. Unsere Ergebnisse verdeutlichen aber auch, dass die Simulations- und Vorhersagequalität für solche Ereignisse stark von der Güte der (operationellen) Radarprodukte und der Niederschlagsvorhersagen abhängt. Radar-Niederschläge und Niederschlagsvorhersagen sind hinsichtlich Menge, Intensität, zeitlichem Verlauf und genauer räumlichen Lage aber nach wie vor mit erheblichen Unsicherheiten behaftet (CECINATI et al., 2017; LUBW, 2020). Daher sollten die Vorhersagen für Hochwasser in Folge lokaler Starkregen generalisiert und in regionale Warnhinweise überführt werden. Zudem sollte neben Weiterentwicklungen an LARSIM ein Hauptaugenmerk auch auf der weiteren Verbesserung operationeller radarbasierter Niederschlagsmessungen und -vorhersagen liegen.

Insbesondere die nun mögliche flächendifferenzierte Simulation des Infiltrationsüberschusses infolge intensiver Niederschläge eröffnet neben der operationellen Vorhersage weitere Anwendungsmöglichkeiten des WHM LARSIM. So kann das Modell zur Ermittlung der Eingangsgrößen für Starkregengefahrenkarten und zur validen Berechnung von Horton-Oberflächenabfluss bei der Modellierung diffuser Stoffeinträge über Abschwemmung und Erosion genutzt werden.

Selbstverständlich sollte der hier vorgestellte Infiltrationsansatz für zusätzliche Ereignisse und Einzugsgebiete validiert werden, um möglicherweise bislang übersehene Defizite aufzuzeigen. Unmittelbares Verbesserungspotenzial besteht bei der Berechnung der Abflusskonzentration von Oberflächenabfluss. Diese sollte zukünftig vorzugsweise mit einem robusten kalibrierfreien Verfahren erfolgen, wobei auch der Rückhalt an der Geländeoberfläche und die mögliche Infiltration auf dem Fließweg ins Gewässer berücksichtigt werden sollten. Langfristig erscheint es erstrebenswert, die physikalische Basis des Modells weiter auszubauen, soweit die großräumigen Datengrundlagen dies erlauben. Hierdurch sollte vor allem auch eine verbesserte Simulation bei gleichzeitigem Auftreten von Horton-Oberflächenabfluss und sättigungsbedingtem Hochwasserabfluss ermöglicht werden.

Conclusion and outlook

The present work describes the integration of the physically based infiltration module of the research model RoGeR into the water balance model LARSIM. A robust parameterization strategy for the module has been developed on the basis of readily available land use and soil data and has been applied to different regions. The validity of the newly implemented module, its parameterization and its transferability to different regions is successfully tested for seven intense rain events in five different catchments in Baden-Württemberg, Luxembourg and North-Rhine Westphalia.

The analysis shows that the discharge reaction of the catchments triggered by intense summer precipitation can be well simulated using the refined model, if precipitation data is sufficiently precise. Also considering the validation results for 46 additional events in 24 additional catchments in Baden-Württemberg (STEINBRICH et al., 2016; HAAG et al., 2019), it can thus be deduced that the relevant processes are well captured with the newly integrated infiltration module and that the presented parameterization is successful. The results presented for Luxembourg and North-Rhine Westphalia suggest that the parameterization strategy is also applicable to regions outside the federal state of Baden-Württemberg.

This constitutes an important precondition for predicting floods caused by intense precipitation with LARSIM. However, our results also highlight the importance of precipitation input for the quality of discharge forecasts. Radar based precipitation measurements and forecasts are still associated with considerable uncertainty with respect to quantity, intensity, temporal evolution and spatial distribution (CECINATI et al., 2017; LUBW, 2020). Therefore, it is advisable to generalize the predictions of floods caused by local storms and use them as a basis for regional flood warning. Besides enhancing the hydrological model LARSIM it is also important to further improve radar based real-time precipitation measurements and forecasts.

The spatially distributed simulation of infiltration excess after intense rain events also enables the utilization of LARSIM for other purposes. The model can for example be applied to determine the spatially distributed infiltration excess as the input for the hydraulic simulation of flashflood hazard maps. Moreover, the realistic quantification of Horton Overland Flow may also improve the modeling of diffuse emissions via surface runoff and erosion.

Further validation for additional catchments and events is recommended, in order to identify so far overlooked potential deficits of the infiltration approach presented here. Immediate potential for improvement exists concerning the simulation of runoff concentration of the overland flow in LARSIM. This should preferably be tackled by a robust approach free of calibration, also taking into account retention at the terrain surface and possible infiltration along the flow path towards the watercourse. In the long run, it seems desirable to expand the physical foundation of the model along with the availability of reliable large-scale data. This should particularly permit an improved simulation of situations in which Horton Overland Flow and saturation driven runoff occur at the same time.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Die verwendeten Modelle sind Eigentum der jeweiligen im Artikel genannten Auftraggeber und werden durch die Autoren daher nicht öffentlich zugänglich gemacht. Die im Rahmen der Studie erzeugten Modellergebnisse können auf ordnungsgemäße Anfrage bei den Verfassern und mit Zustimmung der jeweiligen Auftraggeber zur Verfügung gestellt werden.

Danksagung

Die Implementierung des Infiltrationsmoduls in LARSIM, die Ausarbeitung der Parametrisierungsstrategie, die landesweite Parametrisierung für Baden-Württemberg sowie die Analysen der drei baden-württembergischen Einzugsgebiete erfolgten im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW). Wir

danken insbesondere Dr. Manfred Bremicker für die Initiierung der Arbeiten sowie Angela Sieber, Ulla Schlenk und Ute Badde für die Datenbereitstellung und die umfangreiche Unterstützung bei der Durchführung. Wir danken dem LfU Rheinland-Pfalz für die Übertragung der Parametrisierung auf das Mosel-Einzugsgebiet. Die Analyse der beiden Hochwasser an der Weißen Ernz erfolgte im Auftrag der luxemburgischen Administration de la gestion de l'eau (AGE). Wir danken vor allem Noémie Patz und Christophe Gilbertz von der AGE für die Bereitstellung der Daten und die Begleitung der Arbeiten für die Weiße Ernz. Die Arbeiten für das Einzugsgebiet in Nordrhein-Westfalen wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WGR1431F gefördert. Die Verantwortung für die Inhalte der Veröffentlichung liegen jedoch bei den Autoren. Darüber hinaus danken wir Julianna Regenauer, Katharina Teltscher, Michael Kraft und Dr. Manuel Antonetti für ihre Unterstützung im Zusammenhang mit der Simulation von Starkregen mit LARSIM. Abschließend bedanken wir uns bei zwei anonymen Gutachtern, deren konstruktive Hinweise zur Verbesserung des Manuskripts beigetragen haben.

Anschriften der Verfasser

Dr.-Ing. Ingo Haag
 Julia Krumm, M.Sc.
 Dirk Aigner, Dipl. Geogr.
 HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt
 und Wasserwirtschaft mbH
 Ritterstraße 9
 76137 Karlsruhe
 ingo.haag@hydron-gmbh.de
 julia.krumm@hydron-gmbh.de
 dirk.aigner@hydron-gmbh.de

Andreas Steinbrich, Dipl.-Hyd.
 Prof. Dr. Markus Weiler
 Professur für Hydrologie der Universität Freiburg
 Friedrichstraße 39
 79098 Freiburg
 andreas.steinbrich@hydrology.uni-freiburg.de
 markus.weiler@hydrology.uni-freiburg.de

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung – KA5*. Schweizerbart, Stuttgart; 5. Auflage.
- AGE – ADMINISTRATION DE LA GESTION DE L'EAU, LUXEMBOURG (2020): *Vorstudie zur Fortschreibung des operationellen LARSIM Systems zur Hochwasserfrühwarnung in kleineren Einzugsgebieten im WHM Sauer – Starkregen Weiße Ernz*. HYDRON GmbH im Auftrag der AGE, unveröffentlicht.
- AGE – ADMINISTRATION DE LA GESTION DE L'EAU, LUXEMBOURG (2021): *LARSIM-Wasserhaushaltsmodellierung und Ermittlung von Abflusskomponenten als Grundlage für die Modellierung diffuser Stoffeinträge mit MoRE für Luxemburg*. HYDRON GmbH im Auftrag der AGE, unveröffentlicht.
- BARTELS, J., BLIEFERNICHT, J., SEIDEL, J., BÁRDOSSY, A., KUNSTMANN, H., JOHST, M. & N. DEMUTH (2017): *Bewertung von Ensemble-Abflussvorhersagen für die operationelle Hochwasserwarnung*. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 61, (5), 297–310. DOI: 10.5675/HyWa_2017,5_1.
- BBK – BUNDESAMT FÜR BEVÖLKERUNGSSCHUTZ UND KATASTROPHENHILFE (2015): *Die unterschätzten Risiken "Starkregen" und "Sturzfluten"*. Ein Handbuch für Bürger und Kommunen.
- BERNDT, C. (2020): *Dokumentation zur Aufbereitung der Bodendaten für das neue LARSIM-Bodeninfiltrationsmodul – Teil 1*. Interne Dokumentation des LfU Rheinland-Pfalz.
- BEVEN, J. (2012): *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. John Wiley & Sons, New York; 2. Auflage.
- BEVEN, K.J. & R.T. CLARKE (1986): *On the variation of infiltration into a homogeneous soil matrix containing a population of macropores*. *Water Resources Research*, 22 (3), 383–388.
- BLOUIN, M., HODSON, M.E., DELGADO, E.A., BAKER, G., BRUSSAARD, L., BUTT, K.R., DAI, J., DENDOOVEN, L., PERES, G., TONDOH, J.E., CLUZEAU, D. & J.-J. BRUN (2013): *A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services*. *European Journal of Soil Science*, 64, 161–182.
- BORGA, M., ANAGNOSTOU, E.N., BLÖSCHL, G. & J.-D. CREUTIN (2011): *Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project*. *Environmental Science & Policy* 14 (7), 834–844. DOI: 10.1016/j.envsci.2011.05.017.
- BRAHMER, G. (2010): *Operationelle Wasserhaushaltsmodellierung zur Hochwasservorhersage in Hessen*. Jahresbericht 2009 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Wiesbaden.
- BREMICKER, M. (2000): *Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele*. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg.
- BREMICKER, M., BRAHMER, G., DEMUTH, N., HOLLE, F.-K. & I. HAAG (2013): *Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und weitere Anwendung*. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 6 (9), 509–519.
- BREMICKER, M., CASPER, M.C. & I. HAAG (2011): *Extrapolationsfähigkeit des Wasserhaushaltsmodells LARSIM auf extreme Abflüsse am Beispiel der Schwarzen Pockau*. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 2011/4 (8), S. 445–451.
- BREMICKER, M., HOMAGK, P. & K. LUDWIG (2006): *Hochwasserfrühwarnung und Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg*. *Wasserwirtschaft*, 2006 (7–8), S. 46–50.
- BRONSTERT, A., AGARWAL, A., BOESSENKOOL, B., FISCHER, M., HEISTERMANN, M., KÖHN-REICH, L., MORAN, T. & D. WENDI (2017): *Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines "Jahrhundertereignisses"*. Teil 1: *Meteorologische und hydrologische Analyse*. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 61. 2017 H.3, 150–162.
- BRONSTERT, A., THIEKEN, A., AGARWAL, A., BOESSENKOOL, B., FISCHER, M., HAHN, I., KÖHN, L., LAUDAN, J., MORAN, T., ÖZTÜRK, U., RIEMER, A., RÖZER, V., SIEG, T., VOGEL, K., & D. WENDI (2016): *Die Sturzflut in Braunsbach, Mai 2016 – Eine Bestandsaufnahme und Ereignisbeschreibung*. Taskforce im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs Natural Hazards and Risks in a Changing World an der Universität Potsdam. www.geo.uni-potsdam.de/tl_files/news/TaskForceBraunsbach.pdf.
- CAPOWIEZ, Y., SAMMERTINO, S. & E. MICHEL (2014): *Burrow systems of endogeic earthworms. Effects of earthworm abundance and condescence for soil water infiltration*. *Pedobiologia* 57:303–309. DOI:10.1016/j.pedobi.2014.04.001.
- CECINATI, F., RICO-RAMIREZ, M.A., HEUVELINK, G.B., & D. HAN (2017): *Representing radar rainfall uncertainty with ensembles based on a time-variant geostatistical error modelling approach*. *Journal of Hydrology*, Nr. 548: S. 391–405. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.053.
- DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (2016): *Starkniederschläge in Deutschland*. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland.
- GEOLOGISCHER DIENST NRW (2018): *Informationssystem Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen im Maßstab 1 : 50 000 (IS BK 50)*. Abgerufen am: 15.03.2018. <http://www.gis-rest.nrw.de/atomFeed/rest/atom/5c120c49-1486-4fc0-827c-da14624af4a4.html>.

- GERLINGER, K. & N. DEMUTH (2001): The LARSIM model of the Moselle river basin as an example of flood forecasting in a transboundary water system. IHP/OHP-Berichte Sonderheft 12 "Hydrological Challenges in Transboundary Water Resources Management", Koblenz, S. 219–222.
- GÖPPERT, H. (2018): Auswertung von abgelaufenen Starkregenereignissen über Radarmessungen. *Wasserwirtschaft*, Heft 11/2018, 44–50.
- GREEN, W.H. & G.A. AMPT (1911): Studies in soil physics. 1 The flow of air and water through soils. *Journal of Agriculture Science*, 4, 1–24.
- HAAG, I., AIGNER, D. & G. RAFFEINER (2019a): Ein robustes Gletschermodul für die Hochwasservorhersage in hochalpinen Gebieten: Entwicklung, Parametrisierung und Validierung auf der Basis unterschiedlicher verfügbarer Daten. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 41.19, S. 99–104.
- HAAG, I., AIGNER, D., KRUMM, J., REGENAUER, J., STEINBRICH, A., WEILER, M., SIEBER, A. & M. BREMICKER (2019b): Simulation von Hochwassern in der Folge von Starkregen mit LARSIM – ein Beispiel für die zielführende Nutzung vorhandener Bodendaten. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 41.19, S. 105–110.
- HAAG, I., JOHST, M., SIEBER, A. & M. BREMICKER (2016): Leitfaden zur Kalibrierung von LARSIM-Wasserhaushaltsmodellen für den operationellen Einsatz in der Hochwasservorhersage. LARSIM-Entwicklergemeinschaft.
- HAHN, C., PRASUHN, V., STAMM, C., LAZZAROTTO, P., EVANGELOU, M. W. H., & R. SCHULIN (2013): Prediction of dissolved reactive phosphorus losses from small agricultural catchments: calibration and validation of a parsimonious model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 3679–3693. DOI: 10.5194/hess-17-3679-2013.
- HAPUARACHCHI, H., WANG, Q. & T.C. PAGANO (2011): A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrol. Process.* 25 (18), 2771–2784.
- HARTGE, K.H. & R. HORN (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. Schweizerbarth science publishers, Stuttgart; 4. Auflage.
- HELSEL, D.R. & R.M. HIRSCH (2002): Statistical Methods in Water Resources. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation. Chapter A3. USGS. DOI: 10.3133/twri04A3.
- HENGST, A. (2021): Dokumentation zur Aufbereitung der Bodendaten für das neue LARSIM-Bodeninfiltrationsmodul – Teil 2. Interne Dokumentation des LfU Rheinland-Pfalz.
- KRUMM, J., HAAG, I. & K. TELTSCHER (2020): Multidisziplinäre Datenakquisition als Schlüssel für ein global anwendbares Wasserressourcenmanagement – Teilprojekt 2: Wasserhaushaltsmodellierung. Schlussbericht des BMBF-Projekts mit dem Förderkennzeichen 02WGR1431F.
- LAZZAROTTO, P., PRASUHN, V., BUTSCHER, E., CRESPI, C., FLÜHLER, H. & C. STAMM (2005): Phosphorus export dynamics from two Swiss grassland catchments. *J. Hydrol.*, 304 (1–4): 139–150. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.07.027.
- LEG – LARSIM ENTWICKLERGEMEINSCHAFT (2020): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. <http://www.larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf>, Stand: 05.03.2020.
- LGRB – LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU (2017): Bodenkarte 1 : 50.000 (GeoLa BK 50). <http://maps.lgrb-bw.de>.
- LUBW – LANDESANSTALT FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (2017): Fortschreibung der WHM Oberrhein, Hochrhein und Bodensee mit aktualisierten Bodendaten und landesweite LARSIM-Ausgaben für METRIS (Monatswerte für 1998–2014). HYDRON GmbH im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (unveröffentlicht).
- LUBW – LANDESANSTALT FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (2019): LARSIM-Weiterentwicklungen für Starkregenereignisse. HYDRON GmbH in Zusammenarbeit mit der Professur für Hydrologie (Uni Freiburg) im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (unveröffentlicht).
- LUBW – LANDESANSTALT FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG (2020): Analyse von Starkregenereignissen für das gesamte Einzugsgebiet des oberen Neckars bis Wendlingen. HYDRON GmbH im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (unveröffentlicht).
- LUBW – LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2016): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/wasser/starkregen>
- LUCE, A., HAAG, I. & M. BREMICKER (2006): Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen zur kontinuierlichen Abflussvorhersage in Baden-Württemberg. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50(2), 58–66.
- LUDWIG, K. (1982): The Program System FGMOD for Calculation of Runoff Processes in River Basins. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* 23, S. 25–37.
- MOOG, D.B. & G.H. JIRKA (1998): Analysis of reaeration equations using mean multiplicative error. *Journal of Environmental Engineering*, 125(1): 104–110.
- PELOSI, C., GRANDEAU, G. & Y. CAPOWIEZ (2017): Temporal dynamics of earthworm-related macroporosity in tilled and non-tilled cropping systems. *Geoderma* 289: 169–177. DOI:10.1016/j.geoderma.2016.12.005.
- PESCHKE, G. (1985): Zur Bildung und Berechnung von Regenabfluss. *Wissensch. Zeitschrift der TU Dresden*, Nr. 34(4), 195–200.
- RECK, A., JACKISCH, C., HOHENBRINK, T., SCHRÖDER-ESSELBACH, B., ZANGERLÉ, A. & L. VAN SCHAİK (2018): Impact of temporal macropore dynamics on infiltration: field experiments and model simulations. *VZJ*. DOI: 10.2136/vzj2017.08.0147.
- STEINBRICH, A. & M. WEILER (2012): Abflussbildung und Abflusskomponenten (Atlas Tafel 6.5) Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart (2001): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg, 4. Lieferung 2012.
- STEINBRICH, A., LEISTERT, H. & M. WEILER (2016): Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. *Environ. Earth Sci.* (2016)75, 1423. DOI: 10.1007/s12665-016-6234-9.
- TANG, X., ZHU, B. & H. KATOU (2012): A review of rapid transport of pesticides from sloping farmland to surface waters: processes and mitigation strategies. *J. Environ. Sci.*, 24, 351–361.
- TODINI, E. (1996): The ARNO rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 175, 339–382.
- VILLINGER, F., EHRET, U., NEUPER, M., IHRINGER, J. & H. GYSI (2017): Einfluss der räumlichen Niederschlagsheterogenität auf Hochwasserscheitel: Untersuchungen mit Niederschlagsradar. *KW-Korrespondenz Wasserwirtschaft* (2017), Heft 11, S. 693–698.
- VOGELBACHER, A. (2006): Hochwasservorhersage an Donau und Inn in Bayern. *Wiener Mitteilungen Band 199 Teil 3: Hochwasservorhersage – Erfahrungen, Entwicklungen & Realität*. ÖWAV – Seminar am 19./20.10.2006.
- WEILER, M. (2001): Mechanisms controlling macropore flow during infiltration. Dye tracer experiments and simulations. *Schriftenreihe des Instituts für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich*, Nr. 7, S. 150.
- WEILER, M. (2005): An infiltration model based on flow variability in macropores: development, sensitivity analysis and applications. *Journal of Hydrology*, Nr. 310, S. 294–315.

- WESSOLEK, G., KAUPENJOHANN, M. & M. RENGER (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Bodenökologie und Bodengenese, Heft 40.
- WINTERRATH, T., BRENDEL, C., JUNGHÄNEL, T., KLAMETH, A., WALAWENDER, E., HAFER, M. & E. WEIGL (2017): Erstellung einer dekadischen radargestützten hochauflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderung des Extremverhaltens von Niederschlag) – Ein Projekt der Strategischen Behördenallianz "Anpassung an den Klimawandel" von UBA, THW, BBK, BBSR und DWD, Abschlussbericht. 72 Seiten.
- WINTERRATH, T., BRENDEL, C., HAFER, M., JUNGHÄNEL, T., KLAMETH, A., LENGFELD, K., WALAWENDER, E., WEIGL, E. & A. BECKER (2018): RADKLIM Version 2017.002: Reprozessierte, mit Stationsdaten angeeichte Radarmessungen (RADOLAN), 5-Minuten-Niederschlagsraten (YW). DOI: 10.5676/DWD/RADKLIM_YW_V2017.002.
- ZHAO, R.J. (1977): Flood forecasting method for humid regions of China. East China Institute of Hydraulic Engineering, Nanjing, China.