Professur für Hydrologie

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Georges Bruns

Evaluierung des neuen dynamischen Infiltrationsmoduls aus RoGeR in LARSIM für das Einzugsgebiet der Weißen Ernz

Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg im Breisgau, 15. März 2021

Professur für Hydrologie

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Georges Bruns

Evaluierung des neuen dynamischen Infiltrationsmoduls aus RoGeR in LARSIM für das Einzugsgebiet der Weißen Ernz

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler

Korreferent: Jun.-Prof. Dr. Andreas Hartmann

Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg im Breisgau, 15. März 2021

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich einer Reihe von Menschen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zunächst möchte ich mich herzlich bei Prof. Dr. Markus Weiler und bei Jun.-Prof. Dr. Andreas Hartmann für die Vergabe dieses Themas und die Betreuung während der Arbeit bedanken.

Weiterer Dank gilt Frau Noémie Patz, Service Hydrométrie, Administration de la Gestion de l'Eau, in Luxemburg, die mir das Thema vorgeschlagen hat und stets für Fragen zur Verfügung stand. Dementsprechend bedanke ich mich auch bei den Mitarbeitern des Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz und der Hydron GmbH für diese Möglichkeit. Ebenfalls bedanke ich mich bei Robert Colbach, Service géologique de l'Etat, Administration des Ponts et Chaussées, für die Bereitstellung geologischer Daten.

Zu guter Letzt bedanke ich mich herzlich bei meiner Familie, Freunden und Kommilitonen, welche mir mit Rat und Tat zur Seite standen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis . . . . . **III**

Tabellenverzeichnis . . . . . **VI**

Zusammenfassung **1**

1 Einleitung **2**

2 Stand der Forschung **3**
2.1 Abflussbildungsprozesse 3
2.2 Abfluss Modellierung 7
2.2.1 Modelltypen 9
2.3 Sensitivitätsanalyse & Unsicherheitsanalyse 14

3 Problemstellung **18**

4 Methoden **19**
4.1 Modellbeschreibung 19
4.1.1 LARSIM 19
4.1.2 RoGeR - Dynamische Infiltration 22
4.2 Modellverhalten 22
4.2.1 und Interaktion zwischen Infiltrationsmodul und Bodenspeicher 24
4.2.2 Matrixinfiltration 26
4.2.3 Makroporeninfiltration 27
4.2.4 Trockenrissinfiltration 28
4.2.5 Gesamtinfiltration und HOF 29
4.2.6 Flächendifferenzierte Parameter des dynamischen Infiltrationsmodul . . 29
4.3 Modellevaluierung 29
4.3.1 Sensitivitätsanalyse & Unsicherheitsanalyse 31

5 Gebietsbeschreibung **33**
5.1 Statische Eigenschaften 33
5.2 Abfluss- & Niederschlagsdaten 36

6 Ergebnisse **38**
6.1 Untersuchung der Teilgebietsparameter 38
6.2 Untersuchung der Unterteilgebietsparameter 45
6.3 Untersuchung der Niederschlags- und Vorfeuchteunsicherheit 55

7 Diskussion **62**

8 Schlussfolgerung **67**

Literaturverzeichnis **68**

Anhang **73**

A Abbildungen **73**

B Tabellen **85**

Liste der verwendeten Symbole **88**

Ehrenwörtliche Erklärung **90**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Abflussbildungsprozesse nach Steinbrich et al. (2016) 4
Abbildung 2 Uniforme, halb-verteilte und verteilte Modellstruktur nach (Sitterson et al., 2018) 11
Abbildung 3 Schematische Darstellung des LARSIM-Bodenspeichers, nach LEG (2019) 21
Abbildung 4 Schematische Darstellung der Funktionsweise von Abflussbildung, Abflusskonzentration und Wellenablauf im LARSIM-WHM unter berücksichtigung desdynamischen Infiltrationsmodul (LEG, 2019) 24
Abbildung 5 Geographische Lage des Einzugsgebiets der Weißen Ernz 33
Abbildung 6 Geländehöhe des Einzugsgebiets der Weissen Ernz 34
Abbildung 7 Hangneigung des Einzugsgebiets der Weissen Ernz 34
Abbildung 8 Landnutzungskategorien im Einzugsgebiet der Weißen Ernz 35
Abbildung 9 Geologische Formationen des Einzugsgebiets der Weissen Ernz . . . 36
Abbildung 10 Oberbodenarten des Einzugsgebiets der Weissen Ernz 36
Abbildung 11 Ausschnitte des korrigierten Radardatenproduktes für das Ereignis 2016, Niederschlagsintensität in mm 37
Abbildung 12 Vom Modell verwendeter beobachteter Abfluss und gebietsrelevanter Niederschlag der Pegelstationen Larochette und Reisdorf für die Jahre 2016 und 2018 37
Abbildung 13 Scatterplot der Ergebnisse des dritten Monte Carlo Laufes für den Parameter EQD2 39
Abbildung 14 Beispielhaftes Darstellung der HSY-Scatterplots für den sensitiven Parameter BSF, bewertet nach R^2, Larochette 2016. 39
Abbildung 15 Ergebnisse der letzten Monte Carlo Simulationen, 2018 40
Abbildung 16 Übersicht über die 77 zur Modellierung verwendeten Parametersets für den Parameter BSF 42
Abbildung 17 Übersicht über die 77 zur Modellierung verwendeten Parametersets für den Parameter EQD 42
Abbildung 18 Übersicht über die 77 zur Modellierung verwendeten Parametersets für den Parameter EQD2 43
Abbildung 19 Ergebnisse der 77 besten Parametersets letzten Monte Carlo Simulationen, 2018 44
Abbildung 20 Station Larochette 2018, beispielhafte Darstellung der als am effizientesten bewerteten Gruppen an Parametersätzen 45
Abbildung 21 Parameterverteilung der Kategorien an auserwählten Parametersets . 46
Abbildung 22 Verteilung der Parameter der über die drei Kategorien ausgewählte Parametersets. 46

Abbildung 23 Darstellung der Effizienz nach R^2, D und VE zu den Simulationen der variierten Unterteilgebietsparameter an der Pegelstation Larochette für das Parameterset 1 und die Jahre 2016 und 2018. 48
Abbildung 24 Darstellung von ks und Bewertung der Sets anhand R^2 und D. . . . 49
Abbildung 25 Darstellung von ks und Bewertung der Sets anhand VE. 50
Abbildung 26 Darstellung des beobachteten Abfluss, Ausgangssimulation von Unterteilgebietsparameterset 1 und den nach R^2 effizientesten Parameterwerten . . 52
Abbildung 27 Darstellung des beobachteten Abfluss, Ausgangssimulation von Unterteilgebietsparameterset 2 und den nach R^2 effizientesten Parameterwerten . . 53
Abbildung 28 Darstellung des beobachteten Abfluss, Ausgangssimulation von Unterteilgebietsparameterset 3 und den nach R^2 effizientesten Parameterwerten . . 54
Abbildung 29 Vergleich der simulierten Abflussganglinien der drei Teilgebietsparametersets, dem beobachteten Abfluss und der Simulation ohne das dynamische Infiltrationsmodul. 54
Abbildung 30 Abweichung der simulierten zu den beobachteten Abflussvolumen des Ereignisses von 2018 an den Stationen Larochette und Reisdorf für die Varaiation des Niederschlaginputs 56
Abbildung 31 Variation der Komponentenanteile des simulierten Abflusses für das Ereignis 2018 bei Verwendung des Parametersets der dritten Kategorie. 60
Abbildung 32 Abweichung der simulierten zu den beobachteten Abflussvolumen des Ereignisses von 2018 an den Stationen Larochette und Reisdorf für die Variation der Vorfeuchtebedingungen 61
Abbildung A.1 Ausschnitte des korrigierten Radardatenproduktes für das Ereignis 2018, Niederschlagsintensität in mm 73
Abbildung A.2 Scatterplots mit dem sensitiven Parametern BSF nach den letzten Monte Carlo Simulationen. 74
Abbildung A.3 Scatterplots mit dem sensitiven Parametern EQD nach den letzten Monte Carlo Simulationen. 75
Abbildung A.4 Scatterplots mit dem sensitiven Parametern EQD nach den ersten Monte Carlo Simulationen, alle Werte. 76
Abbildung A.5 Scatterplots mit dem sensitiven Parametern EQD2 nach den ersten Monte Carlo Simulationen, alle Werte. 77
Abbildung A.6 HSY Ergebnisse von den Parametern EQD, EQD2 und EKM beim Ereignis 2016 in Larochette 78
Abbildung A.7 HSY Ergebnisse von den Parametern EKL und EKR beim Ereignis 2016 in Larochette 79
Abbildung A.8 Ergebnisse der besten 77 Parametersets der letzten Monte Carlo Simulationen, 2016, bewertet nach D 80
Abbildung A.9 Ergebnisse der besten 77 Parametersets der letzten Monte Carlo Simulationen, 2018, bewertet nach D 81

Abbildung A.10 Ergebnisse der besten 77 Parametersets der letzten Monte Carlo Simulationen, 2016, bewertet nach R^2 82
Abbildung A.11 Ergebnisse der besten 77 Parametersets der letzten Monte Carlo Simulationen, 2016, bewertet nach VE 83
Abbildung A.12 Ergebnisse der besten 77 Parametersets der letzten Monte Carlo Simulationen, 2018, bewertet nach VE 84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vergleich der Grundstruktur von N-A Modellen nach Sitterson et al. (2018) 10
Tabelle 2 Vergleich der räumlichen Struktur von N-A Modellen nach Sitterson et al. (2018) 11
Tabelle 3 Für LARSIM benötigte meteorologische Zeitreihen nach LEG (2019) . 20
Tabelle 4 Für das dynamische Infiltrationsmodul zusätzlich erforderliche landnutzungs-boden-spezifische Parameter in den Gebietsdaten (LEG, 2019) 23
Tabelle 5 Übersicht zu den nach Haag et al. (2016) relevanten Teilgebietsparameter zur Kalibrierung bei Hochwasser. 31
Tabelle 6 Datenherkunft der beschriebenen Daten 33
Tabelle 7 Übersicht über die Parameterwertebreiche der durchgeführten Monte Carlo Simulationen des teilgebietsspezifischen Parametersatzes. 38
Tabelle 8 Übersicht über die Parametersensitivität der durchgeführten Monte Carlo Simulationen des teilgebietsspezifischen Parametersatzes. 38
Tabelle 9 Wertebereiche der Bewertungsmaße für die Parametersätze 41
Tabelle 10 Auswertung der Simulation der UTGB Parametersätze anhand der drei auserwählten Teilgebietsparametersets ausgewertet nach R^2. 51
Tabelle 11 Einschätzung welches Teilgebietsparameterset am besten für das jeweilige Ereignis eingeschätzt wurde 52
Tabelle 12 Darstellung der sinnvollsten Niederschlagsfaktoren, nach Ereignis und Zuordnung aus Tabelle 11, in Bezug auf das Abflussvolumen. 55
Tabelle 13 Übersicht über die Anteilverteilung der Abflusskomponenten im Verlauf der Niederschlagsunsicherheitsanalyse. 57
Tabelle 14 Darstellung der sinnvollsten Vorfeuchtefaktoren, nach Ereignis und Zuordnung aus Tabelle 11, in Bezug auf das Abflussvolumen. 58
Tabelle 15 Übersicht über die Anteilverteilung der Abflusskomponenten im Verlauf der Vorfeuchteunsicherheitsanalyse. 59
Tabelle B.1 In RoGeR berücksichtigte Prozess, zugrunde liegende Methodik und Parameter, nach Steinbrich et al. (2015) 85
Tabelle B.2 Auswertung der Simulation der UTGB Parametersätze anhand der drei auserwählten Teilgebietsparametersets ausgewertet nach D 86
Tabelle B.3 Auswertung der Simulation der UTGB Parametersätze anhand der drei auserwählten Teilgebietsparametersets ausgewertet nach VE 87

Zusammenfassung

Sturzfluten, welche in der Folge von konvektiven Starkniederschlägen entstehen sind räumlich und zeitlich begrenzt. Sie können überall auftreten und können sich besonders zerstörerisch auf kleine ungeschützte Einzugsgebiete auswirken. Das deterministische Wasserhaushaltsmodell LARSIM wird unter anderem in Luxemburg vom Wasserwirtschaftsamt im operationellen Modus zur Vorhersage des Abflussverhaltens bei Hochwasser genutzt. Dadurch können potentielle Gefahrengebiete vorzeitig erkannt werden und die nötigen Maßnahmen getroffen werden. Bei zwei Starkregenereignissen aus den Jahren 2016 und 2018 war das Einzugsgebiet der Weißen Ernz stark betroffen.

Die Auswertung des simulierten Abflussverhaltens unterschritt dabei die beobachteten Spitzenabflüsse teilweise deutlich. Durch die Integration des dynamischen Infiltrationsmodul des RoGeR Modells, soll die Simulationsleistung des LARSIM Modells während Starkregenereignissen, aufgrund dynamischen Ansatzes, verbessert werden. Im Verlauf dieser Studie wurde das LARSIM Modell anhand der Daten beider Ereignisse kalibriert und diverse mögliche Unsicherheitsquellen untersucht. Dazu wurden die simulierten Abflüsse mit den beobachteten Gegenstücken verglichen und bewertet. Durch das integrierte Modul konnten die Abflussprozesse in eine langsame und schnelle Direktabflusskomponente unterteilt werden. Die schnelle Komponente, welche aus Horton'schen Oberflächenabfluss besteht, zeigte eine deutliche Abhängigkeit von der den landnutzungs- und bodenspezifischen Parametern, über welche das Verhalten des dynamischen Infiltrationsmodul gesteuert wird. Die langsame Komponente hingegen vom Formfaktor der Bodensättigungsflächenfunktion. Beide Komponenten sind ebenfalls stark von der Rückhaltekonstanten des entsprechendem Speichers abhängig. Die Niederschlagsdaten haben als treibende Daten einen großen Einfluss auf das Verhalten der Abflussganglinie und der Aufteilung zwischen der schnellen und langsamen Komponenten. Die Daten zur Vorfeuchte der Bodenmatrix beeinflusst die Infiltrationsprozesse zu Beginn des Ereignisses.

Im Verlauf der Untersuchung wurde die Verwendung verschiedener Bewertungsmaße als weiterer mit in die Unsicherheiten einfließender Aspekt identifiziert. Dabei kam die Studie zu dem Ergebnis, dass das in LARSIM integriert dynamische Infiltrationsmodul die Vorhersageleistung LARSIM bezüglich dieser Ereignisse verbessern konnte.

Stichworte: Starkniederschlag, Sturzflut, LARSIM, RoGeR, Sensibilitätsanalyse, Unsicherheitsanalyse, Luxemburg, Abflusskomponenten

1 Einleitung

Überschwemmungen sind die weltweit häufigste Art von Naturkatastrophen und entstehen, wenn Wassermengen normalerweise trockene Landbereiche überflutet. Verschiedene Prozesse können unterschiedliche Arten von Überschwemmungen initiieren. Starkniederschläge, schnell ablaufende Schneeschmelze oder Stürme in Küstenregionen zählen dabei zu den Hauptgründen (WHO, 2021). Überschwemmungen können weitreichende Verwüstungen verursachen, die zum Verlust von Menschenleben und zu Schäden an persönlichem Eigentum und kritischer öffentlicher Gesundheitsinfrastruktur führen. 42 % aller weltweiten Schadkatastrophen haben einen hydrologischen Ursprung und sorgten in den letzten 30 Jahren für gemittelte Schadensummen von 130 Milliarden US-Dollar jährlich (Munich RE, 2016). Zwischen 1998-2017 waren weltweit mehr als 2 Milliarden Menschen von Überschwemmungen betroffen. Besonders in Überschwemmungsgebieten, Gegenden mit nicht widerstandsfähiger Infrastruktur oder Gebieten ohne Frühwarnsystem, können Überschwemmungen der Region und den dort lebenden Menschen erheblichen Schaden zufügen (WHO, 2021).

Sturzfluten sind eine Form von Überschwemmungen. Diese entstehen hauptsächlich durch zeitlich und räumlich begrenzte starke Niederschläge. Starkniederschläge sind meistens konvektive Niederschläge und treten vermehrt im Sommer auf. Oft treten sie in Verbindung mit anderen meteorologischen Katastrophen auf, wie zum Beispiel Hagel oder Tornados (rund 60 Stück jährlich in Deutschland). Sturzfluten verfügen dabei nur über kurzweilige Abflussspitzen, anders als Flussüberschwemmungen, welche langwieriger sind und nicht auf konvektiven Niederschlägen beruhen. Sturzfluten sind dabei unabhängig von dem initialen Gebietszustand. Die Abflussscheitel werden binnen Minuten oder wenigen Stunden (abhängig nach Einzugsgebietsgröße) erreicht und klingen ähnlich schnell wieder ab (Schumann, 2004, LUBW, 2017, Kron et al., 2019, WHO, 2021). Die großen Wassermengen einer Sturzflut sind stets mit zerstörerischen Kräften verbunden. Erosion, Sedimentation und die Mitnahme und Anlagerung von Treibgut führen nicht nur zu großem Schaden an Infrastrukturen, sondern auch dazu, dass die retrospektive Ereignisanalyse erschwert wird. Treibgut kann an Brücken hängenbleiben und bekannte Abflussprofile verändern, gleiches gilt für Erosion und Sedimentation (Ehret und Bàrdossy, 2002). Konvektive Niederschläge hängen stärker als andere Niederschlagstypen von der Temperatur ab, wodurch es zukünftig mit den steigenden Temperaturen vermehrt zu konvektiven Niederschlägen kommen wird (Berg et al., 2013).

Die Simulation von Sturzfluten ist meistens nur schwer umsetzbar, da eine Vielzahl von Faktoren berücksichtigt werden muss und dies, mit den meisten konzeptionellen oder statistischen Modellen, kaum umsetzbar ist. In den letzten Jahren wurden jedoch Fortschritte bezüglich physikalischer Modelle gemacht, welche erlauben Sturzfluten präziser und auch früher vorherzusagen (Hapuarachchi et al., 2011).

Besonders kleine, steile Einzugsgebiete können stark von lokalen Starkniederschlägen betroffen sein. Da diese Gebiete selten mit Messausrüstung ausgestattet sind, können keine Modelle anhand von längeren Datenreihen zu starkniederschlagsbedingten Abflussganglinien kalibriert werden. Um dies zu umgehen wurde an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg das räumlich verteilte Modell RoGeR (Runoff Generation Research) entwickelt, wodurch die einzelnen Abflusskomponenten einer Sturzflut physikalisch, ohne Kalibrierung, berechnet werden können (Steinbrich et al., 2016).

In den Jahren 2016 und 2018 wurde das Einzugsgebiet der Weißen Ernz in Luxemburg von Starkniederschlagsereignissen heimgesucht. Bei dem Ereignis 2016 kamen rund 80 private Wohnhäuser zu Schaden (Luxemburger Wort, 2019).

2 Stand der Forschung

2.1 Abflussbildungsprozesse

Bei der Abflussbildung wirken verschiedene Prozesse zwischen Gebiet und Niederschlag, welche zum Gesamtabfluss führen. Um dieses Geschehen zu Quantifizieren bedarf es einer adäquaten Darstellung relevanter Abflussbildungsprozesse (Scherrer et al., 2007). Diese Prozesse lassen sich in fünf verschiedene Abflusskomponenten unterteilen, welche hauptsächlich durch Niederschlags-, Gebiets- und Hangeigenschaften gesteuert sind (Scherrer und Naef, 2003, Bachmair und Weiler, 2011).

- Horton'scher Oberflächenabfluss (HOA)
- Sättigungsflächenabfluss (SFA)
- Oberflächennaher Abfluss (SSF)
- Zwischenabfluss (ZA)
- Tiefenperkolation (TP)

Horton'scher Oberflächenabfluss
HOA beschreibt den lateralen Oberflächenabfluss, der sich aufgrund eines Infiltrationsüberschusses bildet, wenn Niederschlagsintensitäten die Infiltrationskapazitäten des Oberbodens überschreiten. Restwasser, welches nicht in den Boden eindringen kann, fließt dementsprechend oberflächlich ab (Horton, 1933). Die Infiltrationskapazitäten sind an verschiedene saisonale und gebietsbedingte Faktoren gebunden. Oberflächenversiegelung, Bodenverkrustung, Bodenverdichtung, hydrophober organischer Oberboden, sowie geringer Makroporenanteil und Unterholzbewuchs sind infiltrationshemmende Eigenschaften und fördern die Bildung des HOA

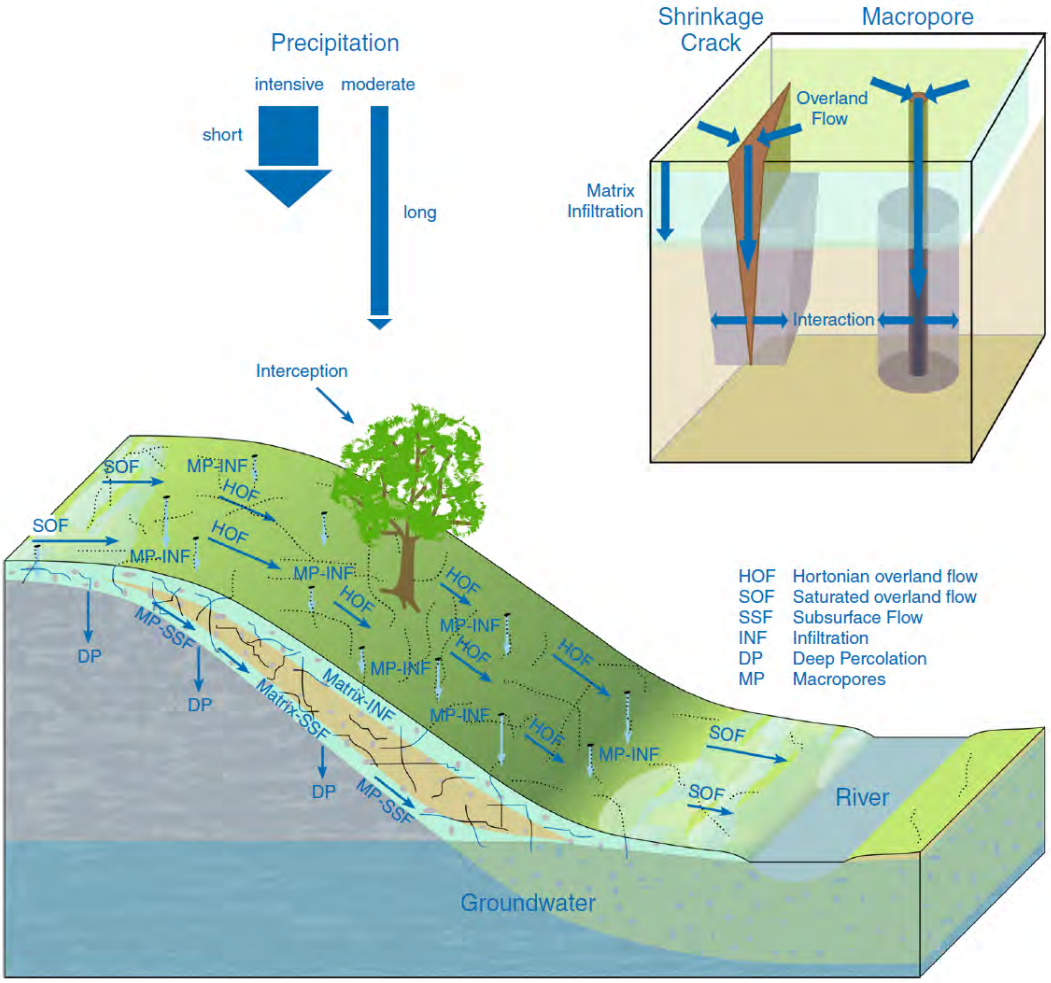

Abbildung 1: Abflussbildungsprozesse nach Steinbrich et al. (2016)

(Doerr et al., 2000, Scherrer und Naef, 2003, Scherrer et al., 2007). Der HOA wird in zwei Unterkategorien eingeteilt; den unmittelbaren horton'schen Oberflächenabfluss (HOA1) und den verzögerten horton'schen Oberflächenabfluss (HOA2). HOA1 tritt unmittelbar nach Ereignisbeginn ein und wird durch infiltrationshemmende Gegebenheiten, wie hohe Tongehalte im Boden, geringe Makroporendichte, starke Verdichtung und felsigen Oberflächen mit geringer Durchlässigkeit gefördert. Bei zunehmender Sättigung des Bodens, sinkt die Infiltrationskapazität, wodurch der Infiltrationsüberschuss entsteht und sich HOA2 bildet. Dieser wird des Weiteren durch hydrophobe Böden, geringe Makroporendichte, versiegelte und verkrustete Böden, sowie einen geringen Wasseraustausch mit der umgebenden Bodenmatrix gefördert (Scherrer und Naef, 2003). Hydrophobe Böden führen oft zu einem zeitweiligen Infiltrationshemmnis, welches im Laufe des Niederschlagsereignis abnimmt (Doerr et al., 2000).

Sättigungsflächenabfluss

SFA beschreibt eine zweite Form des sich oberflächlich bildenden Abflusses. Diese Abflusskomponente bildet sich, im Gegensatz zu HOA, nur, wenn der Boden vollständig gesättigt ist, also die maximale Speicherkapazität des Bodens überschritten wurde (Scherrer et al., 2007). Im Gegensatz zum HOA, welcher meist in semi-ariden bis ariden Gebieten dominierend vorkommt,

bildet sich der SFA in humid-temperate Regionen (Bracken und Croke, 2007). SFA bildet sich wenn das Bodenwasser sich nahe der Oberfläche befindet, geringe Speicherkapazitäten, hoher Infiltrationskapazität und geringen lateralen Fließstrukturen vorzufinden sind und können je nach zeitlichem Auftreten infolge eines Niederschlagsereignisses in drei verschiedene Kategorien unterteilt werden; unmittelbarer, dem verzögerten und dem stark verzögerten SFA (Scherrer und Naef, 2003, Scherrer et al., 2007). Der unmittelbare SFA tritt bei flachgründigen, feuchten, gut durchlässigen Böden, welche schnell gesättigt sind, ein. Der stark verzögerte SFA hingegen bei mächtigen, feuchten, durchlässigen Böden, welche nicht schnell gesättigt sind (Scherrer und Naef, 2003).

Oberflächennaher Abfluss

Dieser Abflussprozess beschreibt die laterale Fließbewegung von Ereigniswasser hangabwärts innerhalb einer lockeren Streuschicht und ist in bewaldeten, steilen Einzugsgebieten anzutreffen (Weiler und McDonnell, 2004). Dieser Abflusstyp wurde oft mit dem HOA verwechselt und wird in der Literatur auch noch „organic layer interflow“, „biomat flow“, „pseudo-overland flow“ und „thatched roof effect“ genannt (Weiler und McDonnell, 2004, Bachmair und Weiler, 2011). Im Gegensatz zu den weiteren Abflusstypen weisen HOA, SFA und der oberflächennahe Abfluss aufgrund ihrer kurzen Laufzeiten einen größeren Anteil des Ereigniswassers vor (Bachmair und Weiler, 2011).

Zwischenabfluss

Der ZA, auch noch „interflow“, „lateral flow“, „subsurface flow“, „throughflow“ und „shallow groundwater flow“ genannt, ist komplexer als die anderen genannten Prozesse (Bachmair und Weiler, 2011). ZA bildet sich in Form eines lateralen Flusses in bevorzugt mächtige Böden, steiler und flacher Hanglagen und steile Gebiete mit durchlässigen Böden. Dieser kann innerhalb der Bodenmatrix oder oberhalb einer undurchlässigen Schicht stattfinden (Scherrer und Naef, 2003). Voraussetzung für ZA ist eine vorübergehende Sättigung von Teilen der Bodenmatrix aufgrund einer gering durchlässigen Schicht, bzw. einer Stauschicht, in vertikaler Richtung. Dies kann eine Gesteinsschicht, Boden höherer Dichte oder einem geringeren Anteil an Makroporen sein (Weiler und McDonnell, 2006).

Der ZA bildet sich hauptsächlich aus zwei verschiedenen Prozessen, lateraler Matrixfluss und präferentielles Fließen. Der laterale Matrixfluss beschreibt einen Wasserfluss, welcher Hangparallel durch durch den Porenraum der Bodenmatrix fließt. Das präferentielle Fließen hingegen beschreibt den Wasserlauf entlang von präferentiellen Fließwegen, welche als Makroporen, sowie Schichten und Bereiche höherer Durchlässigkeit vorzufinden sind. Makroporen bilden sich in der Regel über Wurzeln der umgebenden Vegetation und Bodenlebewesen. Bei Makroporen, welche durch Auswaschungen, Erosion und Risse vergrößert wurden und dadurch über mehrere

Meter verlaufen werden (Boden-) Röhren „pipes“ genannt. Diese Röhren weisen gute Drainagequalitäten auf und können auch im von unterbrochenen Verbindungen im Fall einer ereignisbedingter Sättigung diese Qualität erhalten (Weiler und Naef, 2003). Des Weiteren können sogenannte Knoten einzelne präferentielle Fließwege untereinander verknüpfen. Diese Knoten können Verbindungen zwischen kurzen Makroporen, Bereiche organischer Materie oder lose Bodenbereiche sein (Sidle et al., 2001). Präferentielle Fließwege können auch in Bodenschichten, welche eine hohe Durchlässigkeit aufweisen, wie sehr grobkörnigen Böden, welche eine hohe Porosität, lockeres Moränenmaterial oder periglaziale Ablagerungen vorkommen (Weiler und McDonnell, 2006). Stößt der ZA dabei wieder auf undurchlässige Bereiche oder tritt auf fast gesättigte Bereiche, welche das Wasser über Kapillarkräfte an die Oberfläche bewegen, so kann es zum „Return Flow“ kommen, bei welchem das Wasser wieder an der Oberfläche austritt (Dunne und Black, 1970, Beven, 1989).

Tiefenperkolation

TP oder auch Grundwasserneubildung (Bachmair und Weiler, 2011) genannt, beschreibt den vertikalen Transport von Wasser in durchlässigen, mächtigen Böden oder an flachen Böden, welche über einen durchlässigen Unterboden und unterliegenden Gesteinsschichten verfügen (Scherrer und Naef, 2003). In diesen Schichten kann das Wasser zwischengespeichert werden und dem Grundwasser zufließen. Gebiete welche über über eine sehr durchlässige Bodenmatrix, sowie darunterliegende durchlässige Gesteinsschichten verfügen können die Tiefenperkolation als dominanten Prozess verzeichnen. Das bei kann das versickernde Wasser in Richtung Grundwasser transportiert werden oder als Zwischenabfluss dem Gewässer zugeführt werden. Besonders in Karstgebieten kann dadurch die Tiefenperkolation maßgeblich zur Abflussbildung beitragen (Steinbrich et al., 2016).

2.2 Abfluss Modellierung

Zur Quantifizierung der genannten Prozesse auf räumlicher und zeitlicher Ebene werden hydrologische Modelle benötigt. Dies beruht hauptsächlich darauf, dass viele hydrologische Prozesse anhand der gegebenen Messtechnik nicht quantifizierbar sind. Hydrologische Modelle werden dementsprechend dazu genutzt, die komplexen unterirdischen Prozesse darstellen zu können und bieten ein gutes Werkzeug um Vorgänge zu quantifizieren und Vorhersagen aufzustellen, welche beispielsweise bei der Hochwasservorhersage benötigt werden. Dadurch kann besonders im Bezug auf Vorhersagen zu Starkregenereignissen eine Abschätzung der Abflussmengen geboten werden (Beven, 2012).

Es gibt verschiedene Typen von hydrologischen Modellen, eine Art sind Niederschlags-Abfluss Modelle (NA-Modelle), welche Niederschlag in Abfluss unter Berücksichtigung der relevanten Prozesse in Abfluss umrechnen. Zur NA-Modellierung werden verschieden Datenarten benötigt (Beven, 2012):

Niederschlagsdaten werden hauptsächlich über lokale Messstellen gesammelt und können in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen vorliegen. Da die räumliche Auflösung eines Niederschlagsmessstellennetzes aufgrund von finanziellen und Aufwandsgründen meist begrenzt ist und die Messstelle nur als Punktmessung dient, müssen die Daten zur verbesserten Verwendung räumlich interpoliert werden. Des Weiteren weisen besonders konvektive Niederschlagsereignisse eine große räumliche und zeitliche Variabilität vor, wodurch Niederschlagsvolumen und Intensität schnell variieren können. Niederschlagsmessstellen sind für verschiedene Fehlerquellen anfällig, besonders windbedingte (Beven, 2012).

Radardaten bieten hingegen einen besseren Einblick auf die räumliche und zeitliche Variabilität eines Ereignisses. Elektromagnetische Wellen werden in einem leicht nach oben geneigten Winkel in die Atmosphäre gesendet, welche an den Wassertropfen reflektiert werden. Die Reflektionssignale werden anhand eines Sensors aufgezeichnet. Dadurch können Niederschlagsquantitäten und -intensitäten abgeschätzt und als Rasterdaten interpoliert werden. Das Problem bei Radarsystemen ist, dass das Radar nicht den oberflächennahen Niederschlag misst. Zwischen der Messhöhe und der Erdoberflächen können Wind und wechselnde Niederschlagsintensitäten zu Unterschieden in Niederschlagsmenge und Dauer führen. Des Weiteren wirken neben der Niederschlagsintensität auch der Regentyp, die Tröpfchengröße und der Aggregatzustand sich auf die Qualität der Niederschlagsdaten aus (Beven, 2012).

Abflussdaten spielen eine große Rolle bei der Modellkalibrierung. Dementsprechend stellt die Modellierung von unbeobachteten Einzugsgebieten eine große Hürde in der hydrologischen Modellierung dar. Abflussdaten können auf verschiedene Art und Weisen aufgenommen werden. Über kombinierte Messungen aus Wasserstand und Fließgeschwindigkeit lassen sich bei-

spielsweise Abflussvolumina ableiten. Die Genauigkeit der gemessenen Abflussdaten nimmt mit geringer werdendem Abfluss und uneinheitlichen Durchflussquerschnitts kontinuierlich ab. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass auch bei Hochwasser die Messgenauigkeit sehr stark abnehmen kann. Hohe Wasserstände können die Messtechnik täuschen, da bei fehlendem, bzw. zu kleinem Durchflussquerschnitt, die Wassermaßen um den Querschnitt herum fließen können, wodurch sie nicht vom Messsystem erfasst werden. Des Weiteren können Sedimenttransport und saisonal bedingtes vegetatives Wachstum die Querschnittflächen stark beeinflussen. Starke Turbulenz, uneinheitliche Strömungen und variable Transportfracht im Bereich des Hochwasserscheitels erschweren eine präzise Einschätzung des Scheitelvolumens (Beven, 2012).

Meteorologische Daten bilden die größte Datengruppe. Zu ihr gehören die folgenden Parameter:

- Potentielle Evapotranspiration
- Vegtative Evapotranspiration
- Aktuelle Evapotranspiration
- Schätzung der Schneeschmelze

Digitale Höhendaten können als digitales Höhenmodell (Raster oder Vektor basiert) oder digitales Geländemodell vorliegen. Diese werden dazu genutzt um die Topographie des Einzugsgebietes zu beschreiben. Dabei spielt die Auflösung der Daten eine große Rolle. Eine zu grobe Darstellung führt dazu, dass keine adäquate Beschreibung der Fließwege in Hanglagen aus den Daten abgeleitet werden kann. Zu hoch aufgelöste Datensätze stellen ein anderes Problem dar. Die große Menge an Informationen führt zu einer riesigen Anzahl an Berechnungen innerhalb des Modells, wodurch einerseits große Datenmengen zusammen kommen, andererseits kleinflächige Berechnungen weit mehr Zeit benötigen. Des Weiteren hängt nicht nur die Fließwegbeschreibung und Rechenzeit von der Auflösung ab, sondern auch noch weitere, aus der Topographie abgeleitete Werte (Beven, 2012).

Landnutzungs-, Bodendaten und geologische Daten können bei der Modellierung auf verschiedene Art und Weisen genutzt werden. Dadurch können beispielsweise Gebietseigenschaften der einzelnen Elemente eines Raster beliebiger Größe zugeordnet werden. Des Weiteren können durch die Überlagerung der verschiedenen Informationen einzelne hydrologische Reaktionseinheiten (HRU - hydrological response units) identifiziert und abgeleitet werden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass bodenkundliche Karten nicht unbedingt die zur hydrologischen Modellierung benötigten Informationen enthalten. Beispielsweise können Informationen zur Bodentextur in Pedotransferfunktionen genutzt werden um hydrologisch relevante Informationen zur Porosität und hydraulischen Leitfähigkeit zu erhalten. Diese Werte oder Informatio-

nen können jedoch innerhalb eine Bodeneinheit variieren, wodurch diese bei der Modellierung nicht als absolut angenommen werden dürfen (Beven, 2012).

2.2.1 Modelltypen

Die Klassifizierung von Modellen dient hauptsächlich dazu, ihre Eigenschaften in Form von Möglichkeiten, Grenzen, Stärken und Schwächen zu vergleichen. Dabei gibt es je nach Zielsetzung verschiedene Möglichkeiten die Klassifizierung anzugehen (Knapp et al., 1991). Grundlegend unterscheiden sich die verschiedenen Kategorien von Modellen an den Eingangsdaten, den Parametern und inwieweit physikalische Prinzipien respektiert werden. Eine weitere Unterteilungsmöglichkeit kann anhand räumlichen und zeitlichen Funktionalität der Parameter erfolgen (Devia et al., 2015).

Sitterson et al. (2018) gliederten diese Unterteilung nach zwei Weisen. Tabelle 1 zeigt verschiedene Modellgrundstrukturen und schneidet deren Methodik, Stärken, Schwächen, sowie Anwendungsbereiche an. Die Modellstrukturen werden durch den verwendeten Gleichungstyp zur Beschreibung der hydrologischen Prozesse bestimmt. Empirische Modelle, auch datengesteuerte, Blackbox oder Transfer-Modelle genannt, bilden die einfachste Kategorie von Modellen und zeigen ihre Stärke durch schnelle Rechenzeiten und geringe Anzahl von Parametern. Jedoch bieten diese nur Abflusswerte als Output und sind dementsprechend in ihrer Leistungsfähigkeit begrenzt. Konzeptionelle Modelle bilden die Zwischenstufe zwischen empirischen und physikalischen Modellen, wobei die Übergänge zu letzteren fließend sind (Knapp et al., 1991). Sie beschreiben hydrologische Prozesse durch die Verknüpfung vereinfachter Prozesskomponenten und benötigen eine größere Anzahl an Parametern und Eingangsdaten zur bestmöglichen Darstellung des Verhaltens der Einzugsgebiet abhängigen Prozessabläufe. Des Weiteren bieten sie eine einfache Modellstruktur, berücksichtigen jedoch keine räumliche Variabilität innerhalb eines Einzugsgebietes (Sitterson et al., 2018).

Physikalische Modelle, oder auch hydrodynamische Modelle, basieren auf der physikalischen Beschreibung hydrologischer Teilprozesse. Dazu gehören grundlegende physikalische Gesetze, Wasserbilanzgleichung, Energie- und Massenkonservierung. Die größte Stärke physikalischer Modelle ist der feine Maßstab in dem die räumliche und zeitliche Variabilität der Gebietsdaten berücksichtigt wird. Des Weiteren bieten sie einen dreidimensionalen Einblick in die Wasseraustauschprozesse im Boden, an der Oberfläche und in der Luft. Nichtsdestotrotz ist dieser Detailreichtum auch mit einer riesigen Datenlage und langen Rechenzeiten, standortsspezifischen Daten, sowie einer großen Anzahl an Parametern verbunden, wodurch der Nutzen oft auf kleine Einzugsgebiete, bzw Teileinzugsgebiete beschränkt wird (Knapp et al., 1991, Sitterson et al., 2018). Zusammenfassend soll festgahlten werden, dass empirische Modelle rein datenbasiert sind, konzeptionelle Modelle von der Struktur her vermehrt auf Vorwissen zu den ablaufenden Prozessen, die Parametrisierung hingegen auf Daten basiert und physikalische Modelle rein aus

Kenntnissen und Wissen zu den ablaufenden Prozessen aufbauen. Empirische Modelle beziehen sich auf der statistischen Korrespondenz zwischen Modell Input und Output, ohne jeglichen physikalischen Bezug.

Tabelle 1: Vergleich der Grundstruktur von N-A Modellen nach Sitterson et al. (2018)

	Empirisch	**Konzeptionell**	**Physikalisch**
Methode	Nicht-lineare Beziehung zwischen Input und Output (Blackbox)	Vereinfachte Gleichungen zur Darstellung des Wasserspeichers im Einzugsgebiet (Greybox)	Gleichungssystem basierend auf physikalischen Gesetzen / hydrologischem Verhalten (Whitebox)
Stärken	Geringe Parameteranzahl, kann präzise sein, geringe Laufzeiten	Einfach zu kalibrieren, einfache Modellstruktur	Berücksichtigt räumliche und zeitliche Variabilität, sehr feiner Maßstab
Schwächen	Keine Zusammenhang zum eigentlichen Einzugsgebiet, Verzerrung der Eingabedaten	Berücksichtigt nicht die räumliche Variabilität innerhalb des Einzugsgebiets	Große Anzahl von Parametern, Kalibrierung erforderlich, standortspezifisch
Verwendung	In nicht beobachteten Einzugsgebieten, Abfluss einziger benötigter Input	Wenn Berechnungszeit oder Daten begrenzt sind	Große Datenverfügbarkeit in feiner Auflösung

Die zweite Untergliederung von Sitterson et al. (2018) bezieht sich auf die räumlichen Prozesse innerhalb der Modellstruktur. Uniforme Modelle berücksichtigen dabei keine räumliche Variabilität der Parameter innerhalb eines Einzugsgebiets, sondern sehen es als Einheit an. Sie werden dazu verwendet den gesamten Abfluss am Auslasspunkt zu berechnen. Auch wenn verschiedene Parameter eines uniformen Modells physikalische Eigenschaften besitzen, können diese nicht physikalisch interpretiert werden. Bei uniformen Modellen werden viele Annahmen zu hydrologischen Prozessen berücksichtigt und es kommt oft zu Über- bzw. Unterschätzungen des eigentlichen Abflusses (Knapp et al., 1991, Sitterson et al., 2018). Halb-verteilte Modelle können als uniforme Modelle mit verteilten Eigenschaften bezeichnet werden. Einzugsgebiete werden in diesem Fall in Teilgebiete unterteilt, welchen eigene Parameterwerte zugeschrieben werden. Dadurch können diese sich im Bezug auf ihre hydrologischen Eigenschaften voneinander unterscheiden (Sitterson et al., 2018). Verteilte Modelle sind im Vergleich zu den beiden anderen Kategorien am komplexesten. Sie unterteilen das Einzugsgebiet in kleine Elemente oder Rasterzellen, welche die geographische bedingten Unterschiede der Parameterwerte darstellen. Dementsprechend unterscheidet sich der Ablauf der hydrologischen Prozesse von Zelle (oder Element) zu Zelle. Durch diese schrittweise Berechnung des Abflusses, können detaillierte Abflussinformationen in jeder Zelle abgerufen werden (Knapp et al., 1991, Sitterson et al., 2018). Im Gegensatz zu einem uniformen Modell, ist ein verteiltes Modell sehr rechenintensiv,

jedoch werden die Berechnungen auf physikalischen Grundlagen basierend durchgeführt und nicht wie beim uniformen Modell anhand von Annahmen.

Tabelle 2: Vergleich der räumlichen Struktur von N-A Modellen nach Sitterson et al. (2018)

	Uniform	**Halb-verteilt**	**Verteilt**
Methode	Räumliche Variabilität wird außer Acht gelassen; das gesamte Einzugsgebiet wird als eine Einheit modelliert	Reihe von uniformen und verteilten Parametern	Räumliche Variabilität wird berücksichtigt
Input	Gemittelte Daten nach Einzugsgebiet	Gemittelte als auch spezifische Daten nach Teileinzugsgebieten	Spezifische Daten pro Zelle
Stärken	Schnelle Rechenzeit	Repräsentiert wichtige Merkmale im Einzugsgebiet	Physikalisch mit hydrologischen Prozessen verbunden
Schwächen	Viele Annahmen, Verlust der räumlichen Auflösung, nicht ideal für große Gebiete	Mittelung der Daten in Teileinzugsgebiete, Verlust der räumlichen Auflösung	Datenintensiv, lange Rechenzeit

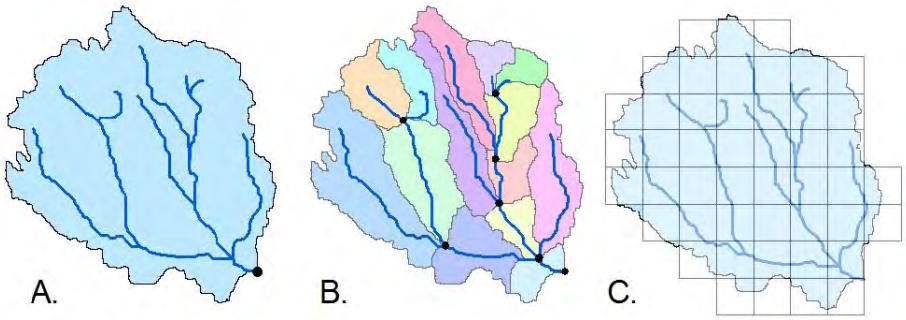

Abbildung 2: Uniforme, halb-verteilte und verteilte Modellstruktur nach (Sitterson et al., 2018)

Laut Hapuarachchi et al. (2011) wurden zur Modellierung von Sturzfluten bis ungefähr zum Anfang des 21. Jahrhunderts vor allem uniforme Modelle verwendet, hauptsächlich ihrer Einfachheit, rechnerischen Effizienz und dem geringen Datenbedarf wegen. Das SAC-SMA (Sacramento Soil Moisture Account Model) Modell wurde vom US National Weather Service (NWS) zur Produktion der „Flash Flood Guidance“ genutzt, wodurch Echtzeitdaten zur Modellierung von Sturzfluten zur Verfügung gestellt wurden, mit dem Ziel dem Modellierer ein besseres Bewusstsein zu Unsicherheiten anzutrainieren (WMO, 2017). Kobold und Brilly (2006) nutzten das HBV Modell von Bergström (1976) zur Sturzflutvorhersage in einem bergigen Einzugsgebiet (Savinja; 1848 km^2) im nordosten Sloveniens. Dabei wurde die HBV-96 Version verwendet, welche anders als HBV in Stundenschritten und nicht in Tagesschritten Berechnungen durchführen kann. Sirdaş und Şen (2007) entwickelten einen neuen empirischen uni-

formen Modellansatz, welcher anhand von Isohyetal Niederschlagskarten synthetische Sturzflutabflussganglinien in ariden Regionen generieren soll. Dabei kamen sie zum Fazit, dass der Kehrwert der Niederschlagsintensität proportional zu seiner Dauer ist und der zeitliche Ablauf der Abflusskonzentration eine Funktion, abhängig von der Einzugsgebietsgröße, des Gefälles, der Geologie, der Bodentypen und der Topographie ist. Foody et al. (2004) nutzen ein auf dem empirischen Hanglagenkonzept des „Soil Conservation Service“ (SCS) basierenden Ansatz zur Sutzflutmodellierung. Die Studie wurde durchgeführt um von Sturzfluten gefährdete Flächen innerhalb der östlichen Wüste Ägyptens zu identifizieren. Treibende Daten waren dabei Daten zur Landnutzung und zu Bodeneigenschaften. Zur Berechnung wurde ein Starkregenereignis simuliert, welches eine ähnliche Abflussspitze bildete wie sie bei einem rezenten Ereignis auftrat. Die simulierten überfluteten Flächen stimmten dabei mit den beobachteten Flutungsflächen überein.

Abgesehen von den erwähnten Vorteilen, ist der Nutzen uniformer Modelle begrenzt. Besonders aufgrund des Nichtbeachtens der räumlichen Variabilität innerhalb des Einzugsgebietes, dem Bedarf jahrzehntelanger Datenreihen und dem Fakt, dass Gewässer nur begrenzt mit Pegeln ausgestattet sind und das Modell an solchen Gewässern nicht angewendet werden kann. Aus diesem Grund wurden viele genutzte uniforme Modelle vermehrt zu räumlich halb- und ganz verteilten Modellen umgebaut (Hapuarachchi et al., 2011).

El-Hames und Richards (1998) entwickelten ein physikalisches, räumlich verteiltes Modell, zur Simulierung von Sturzfluten in ariden Gebieten. Das Modell basierte auf dem numerischen Lösungsansatz der Saint-Venant Gleichung für Kanalabflussführung und der kinematischen Wellengleichung für die Überlandabflussführung mit der Richards-Gleichung für die Bestimmung der Infiltration. Dabei kamen sie zum Schluss, dass das Modell mit nur minimaler Kalibrierung relativ gute Simulationsergebnisse bieten konnte. Eine weitere Studie beschreibt das MARINE (Model of Anticipation of Runoff and INudations for Extreme events) Modell, welches von Estupina-Borrell et al. (2006) erstmals beschrieben und getestet wurde. Erste Simulationen wurden im 250 km^2 großen Einzugsgebiet des Flusses Orbieu in Frankreich, zur Simulation einer Sturzflut, durchgeführt. Die Modellierung des Ereignisses wies gute Resultate auf. Aufgrund der kurzen Rechenzeiten und der frei wählbaren Ergebnisse bietet das Modell auf im operationellen Nutzen eine gut Alternative (Estupina-Borrell et al., 2006). England et al. (2007) nutzen das physikalische, räumlich verteilte Modell TREX (Two-dimensional, Runoff, Erosion and Export), womit sie Fluten in semi-ariden Gebieten der westlichen USA untersuchten. Im 12000 km^2 großen Einzugsgebiet des Arkansas nutzten sie Daten der tausendjährigen Sturzflut aus dem Jahr 1921. Diese wurde mit Daten der Sturzflut von 1894 validiert und die Ergebnisse waren bezüglich Volumen, Ganglinienform und Abflussspitze nahe am eigentlichen Geschehen.

Besonders nicht beobachtete Einzugsgebiete, welche über keine langjährigen Abflussdatenreihen verfügen, wodurch Niederschlags-Abfluss Modelle kaum einen Nutzen bieten, erschweren

hydrologische Vorhersagen, besonders bezüglich durch Starkniederschläge initiierte Sturzfluten und Hochwasser (Steinbrich et al., 2016). Augrund dieser Datenknappheit ist es nötig hydrologisches Verhalten aus den Einzugsgebietsdaten abzuleiten. Dadurch bildete sich das Ziel des besseren Prozessverständnisses, was die Foschungsschwerpunktverlagerung von der Parameteroptimierung hin zum Prozessverständnis und der Modellstrukturdiagnostik begünstigte (Hrachowitz et al., 2013). Zur verbesserten Vorhersage und Quantifizierung der zur Sturzflutabflussgangkurve beitragenden, dynamischen Prozesse während starken Niederschlagsereignissen fehlten die nötige Modelle (Steinbrich et al., 2016).

Steinbrich et al. (2016) entwickelten das physikalische, unkalibrierte, ereignisspezifische NA-Modell RoGeR (Runoff Generation Research) Modell, anhand von welchem die verschiedenen Abflussbildungsprozesse räumlich und zeitlich hoch aufgelöst von der Plot-, hin zur Mesoskala simuliert werden können. Die Parametrisierung des Modells erfolgt über verschiedene ereignisunabhängige Geodaten zur Geologie, Landnutzung, Pedologie und der Topographie. Des Weiteren werden Ereignisabhängige Parameter wie Interzeptionsspeicher, freie nutzbare Feldkapazität (nFK), freie Luftkapazität (LK) und die Trockenrisstiefe benötigt. die Validierung des Modells wurde anhand der Beregnungsveruche von Scherrer (1997) durchgeführt. Auf einer Fläche von 60 m^2 in der Schweiz wurden Niederschlagsintensitäten von 50-100 mm/h simuliert. Zur Parametrisierung wurden Messdaten zum Abfluss, sowie Daten zum Boden, zur Geologie, Landnutzung und Bodenfeuchte genutzt. Ohne Kalibrierung gelang es den Oberflächen-, sowie Zwischenabfluss erfolgreich zu simulieren. Lediglich eine Simulation konnte aufgrund einer hydrophoben Reaktion des trockenen Bodens nicht zufriedenstellend dargestellt werden (Steinbrich et al., 2016).

Des Weiteren wurde das Modell bereits anhand von 33 Hochwasserereignissen in 13 verschiedenen Einzugsgebieten innerhalb Baden-Württembergs getestet. Die verschiedenen Einzugsgebiete wiesen dabei unterschiedliche Eigenschaften bezüglich des Bodens, der Geologie und der Landnutzung auf. Ebenfalls handelte es sich bei den Niederschlagsereignissen um advektive und konvektive Ereignisse und es waren unterschiedliche Vorfeuchtebedingungen vorzufinden. Da es zu diesen Ereignissen keine Informationen zu den einzelnen Abflusskomponenten gab, musste die Modellevaluierung anhand der Abflussganglinie durchgeführt werden. Aufgrund der prozessabhängigen Reaktion des Hydrographen kann die Wichtigkeit der Oberflächenabfluss bildenden Prozesse oder Zwischenabfluss abhängigen Prozesse abgeschätzt werden. Bei dominierendem Oberflächenabfluss kann eine hohe Abflussspitze, sowie ein schneller Abgang der Abflusskurve und vergleichsweise geringere Abflusssummen beobachtet werden. Bei von Zwischenabfluss dominierten Ereignissen, steigt die Abflussspitze nicht so stark an und zieht sich nur langsam zurück. Bei konvektiven Niederschlägen dominieren in der Regel oberflächlich ablaufende Prozesse, bei advektiven hingegen, zeigt sich ein größerer Teil an Zwischenabfluss. Diese Aspekte konnten bei der Simulation von RoGeR wiedergegeben werden, wodurch anhand der Hydrographenform der dominierende Aspekt interpretiert werden kann (Steinbrich

et al., 2016). Des Weiteren stellten Steinbrich et al. (2016) fest, dass RoGeR auch sensitiv auf die Vorfeuchtebedingungen reagiert.

2.3 Sensitivitätsanalyse & Unsicherheitsanalyse

Mit steigender Komplexität des Modells, steigt ebenfalls die Anspruch an den Modellinput, welcher aufgrund von Messungenauigkeiten und Parameter- und Annahmenunschärfe nur schwer zu bieten ist. Diese Unsicherheiten wirken sich auf den Modelloutput aus und müssen bei deren Bewertung berücksichtigt werden. Zur Quantifizierung dieser Bewertungen können zwei ineinander übergreifende Werkzeuge verwendet werden, Sensitivitäts- (SA) und Unsicherheitsanalyse (UA). Nach Saltelli et al. (2000) ist eine Sensitivitätsanalyse eine Untersuchung davon wie Variationen des Modelloutputs auf qualitativer und quantitativer Ebene Variationen des Modellinputs zugeschrieben werden können. Es gibt unterschiedliche Ansätze und Ziele einer SA, wobei sie stetig die Beziehungen Modell- In- und Output untersucht. Besonders im Bezug auf den Umweltbereich, in welchem die Modellierung stetig komplexer und fordernder wird, können Faktoren des Modellinputs von großen Unsicherheiten begleitet sein. Eine SA kann, neben der Modellkalibrierung, aufgrund von unterschiedlichen Zielen durchgeführt werden, dazu gehören nach Saltelli et al. (2000, 2007), Beven (2012), Razavi und Gupta (2015):

- Identifizierung und Priorisierung der einflussreichsten und am stärksten zur Modellreaktion beitragende Faktoren (Faktorpriorisierung)
- Lage und Charakterisierung von Regionen im Faktorenraum, in denen das Modell/System die höchste Variabilität in der Reaktion auf Variationen der Faktoren vorweist. (Mapping, Modellkalibrierung)
- Untersuchung der Art und Stärke der Wechselwirkungen zwischen den Faktoren und des Ausmaßes, in dem die Faktoren die Auswirkungen der jeweils anderen verstärken, aufheben oder kompensieren
- Quantitative Zuordnung der Unsicherheit in der Modellantwort zu verschiedenen Faktoren (Quellen der Unsicherheit), mit dem Ziel, zu ermitteln, wo man sich am besten auf eine verbesserte Faktorcharakterisierung konzentrieren sollte, um eine Verringerung der Gesamtunsicherheit zu erreichen
- Identifizierung der nicht einflussreichen Faktoren und unempfindlichen Komponenten der Modellstruktur um diese einzuschränken bzw. aus dem Modell zu entfernen (Modellreduzierung)
- Identifizierung von Modellfehlern (Bugs) (Modellverifizierung)

Je nach verfolgtem Ziel und Datengrundlage gibt es verschiedene Typen von SA, welche sich anhand ihrer Strategie unterscheiden. Pianosi et al. (2016) beschreibt die unterschiedlichen Strategien anhand von vier verschiedenen Analysetypen:

- Lokale, regionale und globale SA (LSA, RSA, GSA)
- Quantitative und qualitative SA
- „One-At-a-Time“ (OAT) und „All-At-a-Time“ (AAT)
- Settings (Ranking, Screening, Mapping)

Lokale Methoden betrachten Modellparameter als variierende Input und untersuchen, wie sich ihre Unsicherheit auf die Modelloutput auswirkt. Sie kann als Werkzeug zur Bewertung der lokalen Auswirkung der Variation von Eingangsparametern auf die Modellreaktion genutzt werden, indem man sich auf die Sensitivität des Parameters in der Nähe eines Satzes von Parameterwerten konzentriert (Pianosi et al., 2016, Zhou und Lin, 2017).

Bei **globalen Methoden** berüksichtigen neben den Modellparametern auch andere Inputfaktoren des Modells simultan, wie z.B. treibende Modelldaten oder dessen räumliche Auflösung. Anders als bei der lokalen Methode, wird der gesamte mögliche Parameterraum untersucht (Pianosi et al., 2016). Bei globalen SA Methoden wird versucht zu untersuchen und zu quantifizieren, wie und in welchem Ausmaß die Modellreaktion im gesamten Parameterraum durch einen bestimmten Parameter (oder Kombination) beeinflusst wird (Razavi und Gupta, 2015).

Quantitative Methoden quantifizieren den relativen Einfluss der Eingabefaktoren durch ein reproduzierbares Bewertungsmaß (Pianosi et al., 2016).

Bei den **qualitativen Methoden** wird die Sensitivität durch visuelle Inspektion der Modellvorhersagen oder durch spezielle Visualisierungsstrategien (Scatterplots, Tornadoplots oder bewertende Darstellungen der Faktorverteilungen) bestimmt (Pianosi et al., 2016, Saltelli et al., 2019).

Bei den **OAT Methoden** werden Ausgangsvariationen durch die Variation jeweils eines Eingangsfaktors induziert, während alle anderen konstant bleiben. Dies trägt ebenfalls dazu bei, dass die OAT Methode meistens bei lokalen Strategien Verwendung findet. Bei **AAT Methoden** hingegen wird die Variation des Outputs durch die gleichzeitige Variation aller Eingangsfaktoren induziert, wodurch die Wechselwirkungen der einzelnen eingehenden Faktoren berücksichtigt wird. Besonders bei einer regionalen bzw. globalen Strategie wird diese Methode genutzt. Des Weiteren bieten AAT Methoden eine bessere Charakterisierung der Interaktionen zwischen den Eingangsfaktoren, da beispielsweise die Interaktion zwischen mehreren spezifischen Eingangsfaktoren untersucht werden kann. Nachteil ist, dass sie eine große Anzahl von Eingangssätzen generiert, welche mehr Rechen- und Evaluierungszeit benötigen (Razavi und Gupta, 2015, Pianosi et al., 2016, Saltelli et al., 2019).

Setting beschreibt das von der SA verfolgte Ziel, welches beispielsweise als Faktorpriorisierung eine Rangfolge der Faktoren nach relativen Einfluss auf die Outputvariabilität hat. Ein

weiteres Ziel, Screening, dient dazu Eingangfaktoren zu identifizieren, welche keinen Einfluss auf die Variabilität des Outputs haben (Pianosi et al., 2016).

Außerdem wird die Sensitivitätsanalyse als Unterstützung bei der Modellkalibrierung genutzt. Die dabei geltenden Ziele sind dabei die Identifizierung von Regionen im Inputraum, welche die größte Variation des Outputs erwirken. Anhand der GSA Strategie, kann der ganze Parameterraum untersucht werden um die sensitivsten Regionen einzugrenzen. Ebenfalls, kann eine GSA vor der Kalibrierung dazu genutzt werden, um nichts sensitive Parameter zu erkennnen, den Einfluss der Wechselwirkung zwischen einzelnen Parametern regional untersucht werden um die Basis lokaler Analysen zu schaffen. In einem letzten Punkt, trägt die SA während der Modellkalibrierung zur Bewertung des Ausmaßes der möglichen Modellkalibrierung bei, wodurch Rückschlüsse auf nicht-parametrische Unsicherheitsquellen, wie Messfehler innerhalb der Beobachtungen oder in den treibenden Modelldaten gemacht werden können (Pianosi et al., 2016).

Wie bereits erwähnt, hängen Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse oft zusammen, haben Gemeinsamkeiten, unterscheiden sich jedoch in verschiedenen Punkten. Die UA dient als Werkzeug zur Einschätzung der Unsicherheiten im Modell Output ohne dabei mögliche Unsicherheitsquellen festzumachen (Saltelli et al., 2019). Demzufolge kann die SA auch mit der UA kombiniert angewendet werden. Laut Saltelli et al. (2007), Pianosi et al. (2016) konzentriert sich die UA dabei auf die Quantifizierung der Unsicherheit in der Ausgabe des Modells, die SA hingegen die Ausgabeunsicherheit auf die verschiedenen Unsicherheitsquellen (Eingabeparameter, Treibende Daten) aufzuteilen. Auf globaler/regionaler (Sensitivitäts-) Ebene wurden beide Analysen kombiniert weiterentwickelt wodurch die GLUE- Strategie (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation - (Beven und Binley, 1992)) abgleitet wurde (Pianosi et al., 2016).

Eine Herangehensweise aus dem Bereich der globalen Analysen ist die Monte Carlo Technik, bei der eine große Anzahl an Parametersets generiert wird und pro Parametersatz für jeden Parameter zufällige Werte über einen möglichen Wertebereich verwendet werden. Diese Parametersätze werden nach dem Modelllauf bezüglich des generierten Outputs evaluiert, wodurch Informationen zu der Unsicherheit der Modellausgabe, zur Zuweisung von Unsicherheitsanteilen einzelner Faktoren und effiziente Parameterbereiche erzeugt werden können (Saltelli et al., 2000). Eine weitere Entwicklung der Monte Carlo Simulationen ist die regionale Sensitivitätsanalyse (RSA) oder auch „Monte Carlo Filtering“ (MCF) genannt, welche hauptsächlich dazu genutzt wird um Regionen im Paramaterraum zu identifizieren, welche einen starken Einfluss auf die Modellausgabe haben (Pianosi et al., 2016). Diese Strategie wurde erstmals von Young et al. (1978), Spear und Hornberger (1980) (Hornberger-Spear-Young Ansatz - HSY) weiter untersucht. Mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnow Test teilten sie nach dem MCF die Eingangsdaten in zwei Datensätze, einen „verhaltenden“ und einen „nicht-verhaltenden“, je nach dem, ob der relative Modelloutput ein zu erwartendes Verhaltensmuster vorweist oder nicht (Saltelli et al.,

2000, Pianosi et al., 2016). Der HSY Ansatz ist eine nicht-parametrische Methode, da bei ihr keine Annahmen zur Variation, bzw. Kovariation verschiedener Parameterwerte gemacht wird, sondern Parametersets nur in Bezug auf ihre Leistung bewertet werden (Beven, 2012).

Wie bereits erwähnt wurde die GLUE Methode als Weiterentwicklung des MCF generiert. Bei dieser Methode werden eine große Anzahl an durch Monte Carlo Läufe erzeugte Parametersets anhand des Modelloutputs quantitativ bewertet und nach ihrer Effizienz geordnet (Beven, 2012).

3 Problemstellung

Wie im Kapitel 1 erwähnt wurde, stellen aus konvektiven Niederschlägen resultierende Sturzfluten eine große Gefahr für Mensch und Infrastruktur dar. Sie bilden sich auf kleinen räumlichen und zeitlichen Skalen und weisen eine steile Ganglinie mit hoher und zeitlich kurzer Abflussspitze vor. Sie können überall auftreten, werden jedoch stark durch das Landschaftsrelief mit den dazugehörigen Luv- und Leeeffekten auf den Niederschlag beeinflusst (Ehret und Bàrdossy, 2002, LUBW, 2017, Schumann, 2004). Besonders kleine, steile Einzugsgebiete, welche kaum beobachtet werden und dementsprechend über keine langfristigen Abflussreihen verfügen, können nur schwer innerhalb von Modellen kalibriert werden. Es können keine Wiederkehrperioden berechnet werden und Niederschlags-Abfluss-Modelle, welche stark von Beobachtungsdaten abhängen können nicht kalibriert werden (Steinbrich et al., 2016). Ein weiteres Hauptproblem bei ereignisbasierten Simulationen ist die große Unsicherheit der Niederschlagsdaten und der Vorfeuchtebedingungen (Steinbrich et al., 2016). Aufgrund steigender Rechenkraft konnten prozessorientierte physikalische Modelle in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte machen (Beven, 2012). Ein Beispiel dafür ist das erwähnte Modell RoGeR (Steinbrich et al., 2016). Auch in Luxemburg haben Sturzfluten in den letzten Jahren für erheblichen Schaden gesorgt. Durch die Integration des dynamischen Infiltrationsmodul in LARSIM soll die Qualität der Vorhersagen von starkniederschlagsbedingtem Hochwasser im operationellen Dienst erhöht werden. Dementsprechend ist die Zielsetzung dieser Arbeit wie folgt formuliert:

Modellevaluierung:
Zwei Starkniederschlagsereignisse aus den Jahren 2016 und 2018 im Einzugsgebiet der Weißen Ernz sollen mit Hilfe vom Wasserhaushaltsmodell LARSIM und dem dynamischen Infiltrationsmodul des RoGeR Modells untersucht werden. Anhand einer Sensitivitätsanalyse werden sensitive Parameter und Parameterbereiche des LARSIM Modells identifiziert. Ziel ist es Simulationen durchzuführen die die beobachtete Abflussganglinie bestmöglich nachvollziehen können. Des Weiteren werden Unsicherheiten bezüglich der verwendeten Niederschlagsprodukte und der Vorfeuchtegegebenheiten untersucht. In einem letzten Schritt werden die bodenphysikalischen und landnutzungsabhängigen Gebietsparameter auf ihre Unsicherheiten analysiert.

Aus dieser Zielsetzung lassen sich die folgenden Hypothesen aufstellen:

- Hypothese 1: Mit Hilfe des dynamischen Infiltrationsmoduls aus dem RoGeR Modell können Starkregenereignisse präziser simuliert werden als mit der klassischen LARSIM Version
- Hypothese 2: Unsicherheiten des Modellinputs können auch durch das integrierte dynamische Modul nicht umgangen werden.

4 Methoden

4.1 Modellbeschreibung

In diesem Kapitel wird das in dieser Arbeit verwendete deterministische Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) (LEG, 2019) und das dynamische Infiltrationsmodul des RoGeR (Runoff Generation Research) Modell (Steinbrich et al., 2016) beschrieben.

4.1.1 LARSIM

LARSIM wurde um 1994 als hydrologischer Bestandsteil eines gekoppelten Atmosphären-Hydrologie-Modells zur Beschreibung des landgebundenen Wasserkreislaufes des regionalen Klimamodells REMO entwickelt (LEG, 2019). Ziel der Entwicklung war es physikalisch basierte konzeptionelle Modelle zur mesoskaligen Beschreibung des landgebundenen Wassertransportes, auf der Basis von verfügbaren Systemdaten zu kombinieren. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM, wird nach Becker (1995) als konzeptionelles, räumlich verteiltes Modell basierend auf Teilgebieten beschrieben. Es ermöglicht in verschiedenen zeitlichen Auflösungen Flächen und Prozess getreue Simulationen wesentlicher Komponenten des Wasserkreislaufs. Dazu gehören Interzeption, Interzeptionsverdunstung, Akkumulation, Metamorphose und Ablation von Schnee, Infiltration, Bodenwasserhaushalt, Abflussbildung, Tiefenversickerung, Evapotranspiration nach diversen Ansätzen, Abflusskonzentrationen, Translation und Retention von Gerinnen, Wirkung von Oberflächenwasserspeichern, Ein-, Aus- und Überleitungen, sowie den Wärmehaushalt der Fließgewässer mit natürlichen und anthropogenen Einflüssen. In LARSIM sind Einzugsgebiete in Teilgebiete unterteilt, welche entweder als echte hydrologische Teil-Einzugsgebiete oder als Raster aufgebaut sein können und über eine Fließvernetzung untereinander verbunden sind. Die Berechnung der Abflusskonzentrationen im Gerinne wird auf räumlicher Ebene der Teilgebiete durch bis zu vier unterschiedliche schnell reagierende, parallele Einzellinearspeicher umgesetzt. Diese Speicher beschreiben den Basis-, Zwischen-, langsamen und schnellen Direktabfluss, deren zeitlicher Konzentrationsverlauf über Rückhaltekonstanten bestimmt wird. Jedes der Teilgebiete wird in Unterteilgebiete (UTGB, auch HRU genannt) aufgeteilt, welche sich aufgrund ihrer Landnutzung, Bodenspeichervolumina und dominanten Abflusstypen ähneln, wodurch diese eine ähnliche Niederschlagsreaktion vorweisen (LEG, 2019).

Meteorologische Antriebsdaten

Zur Wasserhaushaltsberechnung benötigt LARSIM die in Tabelle 3 aufgelisteten Daten als Zeitreihe.

Als Niederschlagsdaten wurden spezifisch auf die untersuchten Ereignisse angepasste Radolan YW Daten, Version 19.001, des DWDs mit einer zeitlichen Auslösung von 15-Minuten und einer räumlichen Auflösung von 1 km^2 verwendet. Diese wurden im Verlauf eine Unter-

Tabelle 3: Für LARSIM benötigte meteorologische Zeitreihen nach LEG (2019)

Messgröße	Einheit	Dateneigenschaft
Niederschlag	mm	Summenwert pro Zeitschritt
Lufttemperatur	°C	Mittelwert pro Zeitschritt
Rel. Luftfeuchtigkeit	%	Mittelwert pro Zeitschritt
Taupunkttemperatur	°C	Mittelwert pro Zeitschritt
Windgeschwindigkeit	m/s	Mittelwert pro Zeitschritt
Sonnenscheindauer	Stunden/Minuten	Summenwert pro Zeitschritt
Globalstrahlung	W/m^2	Mittelwert pro Zeitschritt
Luftdruck	hPa	Mittelwert pro Zeitschritt

suchungsstudie der 'Hydron GmbH' anhand von weiteren lokalen Stationsdaten, welche dem DWD bei der Anpassung nicht zur Verfügung standen, für die Ereignisse spezifisch optimiert (Haag et al., 2020).

Speicher

LARSIM verfügt über drei bzw. vier Gebietsspeicher, welche die Wasserabgabe des im Teilgebiet gebildeten Abflusses darstellen.

Der Interzeptionsspeicher beschreibt den ersten Zwischenspeicher, in welchem von der Vegetation zurückbehaltener Niederschlag auf den Blattoberflächen gespeichert wird. Die maximale Kapazität des Interzeptionsspeichers wird anhand eines pflanzen- und jahreszeitlich spezifisch variablen Index, dem Blattflächenindices LAI, nach Gleichung 1 berechnet. Dieser beschreibt das Verhältnis der Blattoberflächen eines Bestandes zur von ihm bedeckten Oberfläche (Dickinson, 1984). Alternativ zum Blattflächenindices kann auch ein dynamisches Vegetationsmodell verwendet werden, wodurch eine realistischere Darstellung des Witterungsverlauf möglich ist. Überschüssiger Niederschlag, welcher auf den Speicher trifft, wird an den Boden weitergeleitet (LEG, 2019).

Der Bodenspeicher dient bei der Abflussbildung als Art Regel- und Verteilersystem, welcher Niederschlags-, bzw. Schmelzwasser speichern, dementsprechend auch der Evapotranspiration zu Verfügung stellen, und den einzeln Abflusskomponenten zuleiten kann. Die Speichermodule beruhen auf dem Xinanjiang Ansatz von Zhao (1980), welcher einen einzelnen Bodenspeicher, der über mehrere Wege befüllt und entleert werden kann, beschreibt. Das Speichervolumen wird dabei aus digitalen Bodenkarten abgeleitet. Die Parametrisierung des Bodenspeicher kann anhand von zwei verschiedenen Herangehensweisen durchgeführt werden. Einerseits wird das gesamte Bodenspeichervolumen vorgegeben und in oberen, mittleren und unteren Bodenspeicher anhand von Schwellenwerten des relativen Bodenwassergehaltes unterteilt. Alternativ können die Volumen der nutzbaren Feldkapazität für den mittleren Bodenspeicher und Luftkapazität

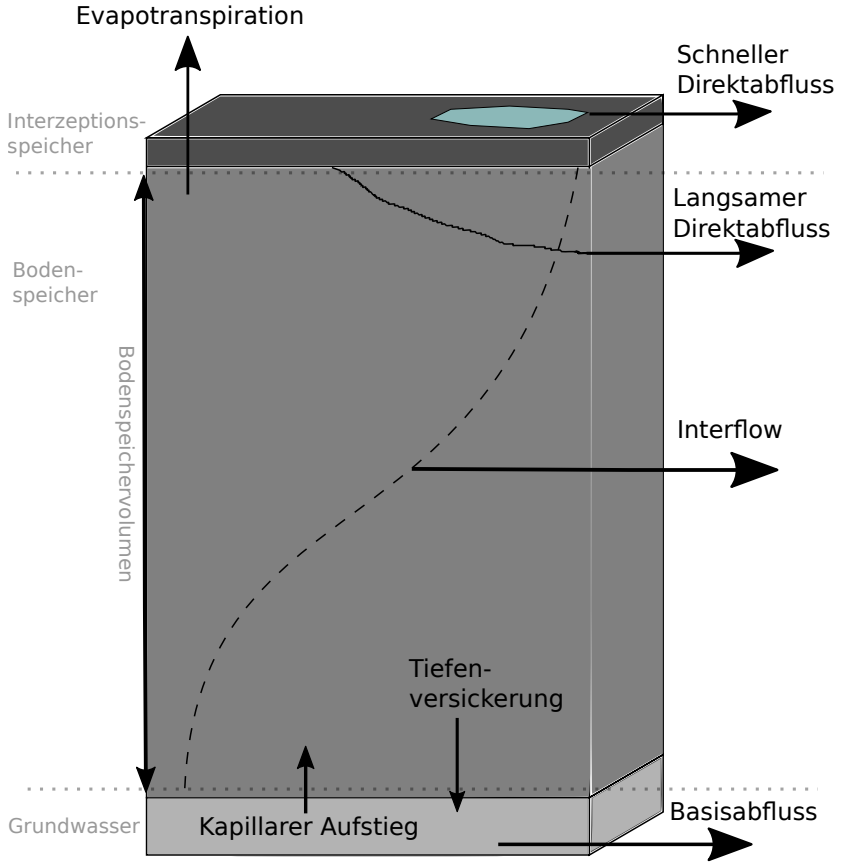

Abbildung 3: Schematische Darstellung des LARSIM-Bodenspeichers, nach LEG (2019)

des oberen Bodenspeicher vorgegeben werden. Anhand der Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion (BSF), welche die schnellen Abflusskomponenten steuert, kann die Bereitschaft zur schnellen Abflussbildung berücksichtigt werden.

$$K_{Inz} = 0.2mm \times LAI \tag{1}$$

mit:

K_{Inz} = Kapazität des Infiltrationsspeichers [mm]
LAI = leaf area index

LARSIM ermöglicht verschiedene Unterteilungen der Abflusskomponenten. Der **Bodenspeicher mit drei Abflusskomponenten** besteht aus Basisabfluss, Interflow und dem Direktabfluss, welcher in diesem Fall alle schnellen Abflussbildungsprozesse beinhaltet Gleichung 2.

Eine weitere Möglichkeit ist die Unterteilung in vier Abflusskomponenten, indem die Direktabflusskomponente in eine langsame und schnelle Teilkomponente zerlegt wird. Diese Aufteilung kann über vier verschiedene Ansätze bewirkt werden:

- Einfacher, doch robuster Schwellenwert für die Rate des Direktabflusses (A2)
- Dynamischer Infiltrationsansatz, basierend auf der Füllung des gesamten Bodenspeichers

- Schwellenwert für die maximale Infiltration bei trockenem Boden
- Physikalisch basierter, dynamischer Infiltrationsansatz nach RoGeR

$$W_0(t+1) = W_0(t) + P(t) - E_{ai}(t) - QS_D(t) - QS_l(t) - QS_G(t) \tag{2}$$

$$W_0(t+1) = W_0(t) + P(t) - E_{ai}(t) - QS_{D2}(t) - QS_{D1}(t) - QS_l(t) - QS_G(t) \tag{3}$$

mit:

$W_0(t)$ = Füllung des Bodenspeichers zum Zeitpunkt t [mm]
$P(t)$ = Wasser aus Niederschlag oder Schneeschmelze [mm]
$E_{ai}(t)$ = Aktuelle Evapotranspiration [mm]
$QS_D(t)$ = Direktabfluss [mm]
$QS_l(t)$ = Laterale Drainage aus dem Bodenspeicher (Interflow) [mm]
$QS_G(t)$ = Vertikale Perkolation aus dem Bodenspeicher [mm]
$QS_{D1}(t)$ = Langsamer Direktabfluss [mm]
$QS_{D2}(t)$ = Schneller Direktabfluss [mm]

Der physikalisch basierte, prozessnahe, dynamische Infiltrationsansatz, wird in LARSIM zur verbesserten Simulation des Infiltrationsüberschusses bei Starkregen genutzt.

4.1.2 RoGeR - Dynamische Infiltration

Wie bereits im Unterkapitel 2.2.1 erwähnt, ist das RoGeR Modell ein unkalibriertes, räumlich verteiltes, skalenübergreifendes und ereignisbasiertes NA-Modell, welches HOA, SFA, ZA und TP des Einzugsgebietes, sowie der Abflusskonzentrationen anhand eines geomorphologischen Einheitsganglinienverfahrens auf einer hohen räumlichen (1x1 m^2), sowie zeitlichen (bis zu 5 Minuten) Auflösung berechnen kann (Steinbrich et al., 2015, 2016). Die im Modell verwendeten Parameter werden aus flächenhaft verfügbaren Daten zur Vegetation, Geologie, Landnutzung, Pedologie, Topographie und den Erkenntnissen jahrelanger Forschung abgeleitet. Tabelle B.1 beschreibt die benötigten Eingangsparameter und die zur Prozessquantifizierung verwendeten Methoden der in RoGeR evaluierten Prozesse (Abb. 1) (Steinbrich et al., 2016).

4.2 Modellverhalten

Das in LARSIM integrierte dynamische RoGeR Infiltrationsmodul dient dazu, die prozessnahe Simulation von Infiltrationsüberschuss bei Starkregenereignissen besser darstellen zu können. Abbildung 4 zeigt eine schematische Darstellung der Abflussbildung von LARSIM inklusive des dynamischen Infiltrationsmoduls. Im folgenden wird der Ablauf LARSIMs mit dem dynamischen Infiltrationmodul RoGeRs dargestellt (LEG, 2019).

Tabelle 4: Für das dynamische Infiltrationsmodul zusätzlich erforderliche landnutzungs-bodenspezifische Parameter in den Gebietsdaten (LEG, 2019)

Parameter	Einheit	Beschreibung
k_s	[mm/h]	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Oberbodens. Parameter des Green-Ampt-Ansatzes
nFK_{Vol}	[%]	nFK des Oberbodens als Volumen-Prozent. Zur dynamischen Ermittlung der effektiven Porosität P_{eff} als Parameter des Green-Ampt-Ansatzes
LK_{Vol}	[%]	LK des Oberbodens als Volumen-Prozent. Zur dynamischen Ermittlung der effektiven Porosität P_{eff} als Parameter des Green-Ampt-Ansatzes
wsf	[mm]	Saugspannung an der Sättigungsfront. Parameter des Green-Ampt-Ansatzes, i.d.R. als Funktion der Textur
MP_{dichte}	-	Anzahl vertikaler Makroporen je m^2 zur Ermittlung des Flächenanteils, der in Makroporen entwässert
$MP_{länge}$	[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

Das dynamische Infiltrationsmodul schaltet sich nur ein, wenn die aktuelle Niederschlagsintensität die aktuelle Infiltrationskapazität überschreitet und ist dabei dem Bodenmodul LARSIMs vorgeschaltet. Zu Beginn eines Starkregenereignisses trifft das Wasserdargebot auf das Infiltrationsmodul, welches physikalisch basiert den Infiltrationsüberschuss berechnet, der als HOF dem Gebietsspeicher für den schnellen Direktabfluss zugeteilt wird. Das infiltrierende Ereigniswasser gelangt zum nachgeschalteten Bodenmodul und wird dort durch die Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion (BSF), welche in Abhängigkeit der Bodenspeicherfüllung die Summe der Komponenten des langsamen Direktabflusses generiert. Ohne das dynamische Infiltrationsmodul würde die schnelle und die langsame Direktabflusskomponente ganz über das Bodenmodul und den Schwellenwert A2 unterteilt werden. Aufgrund der Berechnungen des Infiltrationsmoduls wird dieser Schwellenwert nicht benötigt und dementsprechend deaktiviert. Dadurch wird der über die BSF gebildete SFA nicht weiter in den Speicher des schnellen Direktabflusses geleitet, welcher dementsprechend ausschließlich aus HOA besteht. Die Langsame Komponente wird hingegen die weiteren Abflusskomponenten repräsentieren (hauptsächlich Zwischenabfluss) (LEG, 2019).

Zu der dynamischen Infiltration gehören drei Teilprozesse:

- Matrix-Infiltration
- Makroporen-Infiltration

- Trockenriss-Infiltration

Anfangs verläuft die Infiltration über den Matrix-Speicher. Das Ereigniswasser, welches nicht im Zeitschritt in den Matrixspeicher gelangt, wird über die Makroporen infiltriert und sofern noch Wasser des Zeitschrittes übrig ist, wird dieses über die Trockenrissinfiltration in den Boden geleitet. Das restliche Wasserdargebot wird als Infiltrationsüberschuss angesehen und dem HOF zugeschrieben (LEG, 2019).

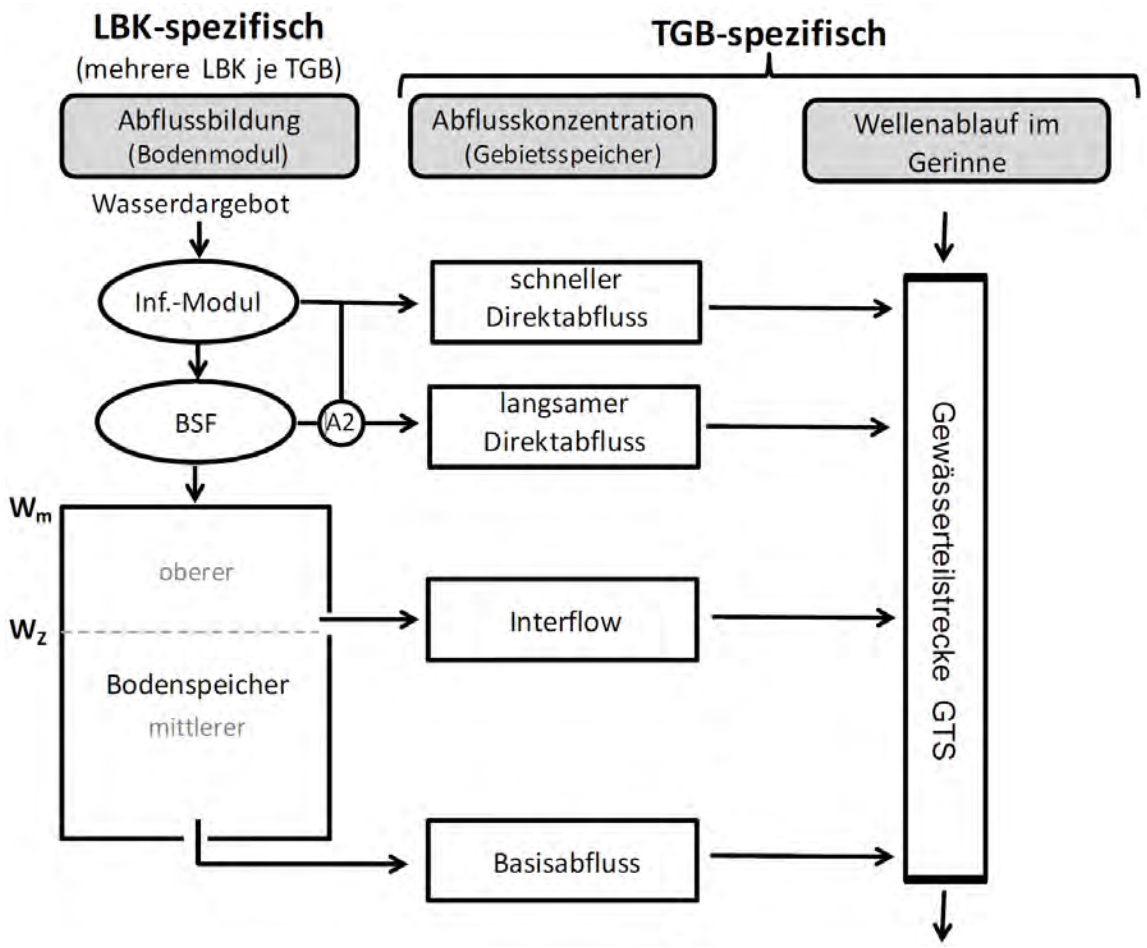

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Funktionsweise von Abflussbildung, Abflusskonzentration und Wellenablauf im LARSIM-WHM unter berücksichtigung desdynamischen Infiltrationsmodul (LEG, 2019)

4.2.1 und Interaktion zwischen Infiltrationsmodul und Bodenspeicher

Zu Beginn eines neuen Infiltrationsereignisses werden in einem ersten Schritt Anfangsbedingungen der aktuellen effektiven Porosität (P_{eff}) und der aktuellen tatsächlichen Tiefe der Trockenrisse (TR_{tiefe}) aus dem Bodenspeicher abgeleitet. Diese bleiben während des Infiltrationsereignisses konstant, da das Umverteilen des Bodenwassers (beispielsweise Quellen und Schrumpfen der Tonminerale) langsamer abläuft als der Infiltrationsprozess. Der Bodenspeicher wird jedoch kontinuierlich weiter mit infiltrierendem Ereigniswasser aufgefüllt um alle Prozesse, welche anhand der Bodenspeicherfüllung berechnet werden, darzustellen. Somit

wird die Wirkung zunehmender Bodenfeuchte bei der Bildung der Abflusskomponenten SSF und SOF weiterhin konzeptionell berücksichtigt. Durch diese dynamische Berechnung der Infiltration über die Bodenmatrix, Makroporen und Trockenrisse kann der Infiltrationsüberschuss bestimmt werden, über welchen HOF berechnet werden kann. Sobald während eines bestimmten Zeitraums der definierte Niederschlag-Intensität-Schwellenwert unterschritten wurde, endet das Infiltrationsereignis. Daraufhin werden keine Berechnungen mehr von Seiten des Infiltrationsmoduls durchgeführt und es wird bis zu nächsten Ereignisbeginn zurück auf den Standardzustand gesetzt (LEG, 2019).

P_{eff} wird über die Absolutwerte von nFK und LK abgeleitet, so dass, wenn die Bodenspeicherfüllung zum Ereignisbeginn größer als die nutzbare Feldkapazität ist, die effektive Porosität gleich LK_{Vol} gesetzt wird. Dies wird getan, da die Oberflächennahen Grobporen schnell drainieren und deren Füllung vor Ereignisbeginn unplausibel ist und sofern es doch der Fall wäre, würde der entstehende SOF über die BSF und den Schwellenwert A2 LARSIM-intern berechnet werden (LEG, 2019).

$$P_{Eff} = \begin{cases} \dfrac{LK_{Vol}}{100} & \text{für } W \geq W_z \quad (4a) \\[2ex] \dfrac{LK_{Vol}}{100} + \dfrac{nFK_{Vol}}{100} + \dfrac{W}{W_z} + & (4b) \end{cases}$$

mit:

P_{eff} = effektives Porenvolumen zu Beginn des Infiltrationsereignisses
nFK_{Vol} = nutzbare Feldkapazität des Oberbodens als Volumen-Prozent [%]
LK_{Vol} = Luftkapazität des Oberbodens als Volumen-Prozent [%]
W = aktuelle Füllung des LARSIM-Bodenspeichers [mm]
W_z = Volumen des mittleren LARSIM-Bodenspeichers [mm]

Die aktuelle Trockenrisstiefe (TR_{tiefe}) wird ebenfalls über die aktuelle Bodenfeuchte berechnet, da diese vom Quellen und Schrumpfen der sich im Boden befindenden Tonminerale abhängt. Als Bestimmungsmaß wird die aktuelle Bodenfeuchte anhand der spezifischen Gebietsparameter AusGr100 und SchrGr100 abgeleitet. Ist die aktuellen Bodenfeuchte größer oder gleich AusGr100, gibt es keine Trockenrisse (Gleichung 5a). Ist sie kleiner gleich SchrGr100 erreichen die Trockenrisse ihre maximale Tiefe (Gleichung 5b). Im Fall, dass die aktuelle Bodenfeuchte zwischen beiden Schwellenwerten liegt, wird sie linear interpoliert (Gleichung 5c) (LEG, 2019).

$$Tr_{Tiefe} = \begin{cases} 0 & \text{für } \frac{W}{W_z} \cdot 100 \geq AusrGr100 \quad (5a) \\ TR_{Tiefe_{max}} & \text{für } \frac{W}{W_z} \cdot 100 \leq SchrGr100 \quad (5b) \\ TR_{Tiefe_{max}} \cdot \left[1 - \frac{\frac{W}{W_z} \cdot 100 - SchrGr100}{AusrGr100 - SchrGr100} \right] & (5c) \end{cases}$$

mit:

TR_{tiefe} = Infiltrationswirksame Tiefe der Trockenrisse [mm]
$TR_{tiefe_{max}}$ = Maximale Tiefe der Trockenrisse bei Bodenfeuchte $\leq$ SchrGr100 [mm]
$AusrGr100$ = Wassergehalt bei der Ausrollgrenze ausgedrückt als Prozentanteil an der nFK [% nFK]
$SchrGr100$ = Wassergehalt bei der Schrumpfungsgrenze ausgedrückt als Prozentanteil an der nFK [% nFK]

Berechnung der Infiltrationsprozesse

4.2.2 Matrixinfiltration

Zur Berechnung der Matrixinfiltration, wird der von Peschke (1985) angepasste physikalische Ansatz nach Green und Ampt (1911) für variable Niederschläge verwendet. Diese Approximation geht dabei von einer uniformen Sättigungsfront aus. Anhand der sich an der Sättigungsfront bildenden Saugspannung, der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens, dem effektiven Porenvolumen und der Niederschlagsintensität kann die Infiltrationsrate in die Bodenmatrix bestimmt werden. Zu jedem Zeitschritt überprüft das Modul ob eine Sättigung der Bodenmatrix gegeben ist. Solange dies nicht der Fall ist, infiltriert das Wasserdargebot in die Bodenmatrix. Sobald eine Sättigung vorzufinden ist, wird der Sättigungszeitpunkt durch die Gleichung 6 und die Infiltrationsmenge durch die Gleichung 7 nach Peschke (1985) berechnet. Anschließend erfolgt die Berechnung der potentiellen Matrixinfiltration (f_{pot}), welche die Differenz aus der kumulativen potentiellen Matrixinfiltration des aktuellen (f_{potkum}) und des vorangegangenen Zeitschritts ist ($f_{potkum_{vor}}$). Im Fall, dass keine Sättigung der Matrix vorliegt, entspricht (f_{potkum}) der Summe des Wasserdargebotes seit Beginn des Infiltrationsereignisses. Andernfalls gilt die Gleichung 8 nach Peschke (1985). Die tatsächliche kumulative Infiltration (f_{kum}) ergibt sich aus der Summe aller Zeitschrittwerte der tatsächlichen Matrixinfiltration, welche für jeden Zeitschritt den kleineren Wert zwischen NI und f_{pot} bezieht. Über den Quotienten aus f_{kum} und P_{eff} erhält man die vertikale Tiefe der Sättigungsfront (mm) (LEG, 2019).

$$ts = t_{mrx} - ta + \frac{ks \cdot wsf \cdot P_{eff}}{NI \cdot (NI - ks)} - \frac{ta}{NI} \cdot (NI_{sum} - NI) \tag{6}$$

$$fs = \frac{wsf \cdot P_{eff} \cdot ks}{NI - ks} \tag{7}$$

$$f_{potkum} = \frac{A}{2} + \left(\frac{A^2}{4} + () \cdot B + fs^2 \right)^{0.5} \tag{8}$$

mit:

ts	= Sättigungszeit innerhalb des Intervalls [h]
t_{mrx}	= Zeit seit Beginn des Infiltrations-Ereignisses [h]
ta	= Rechenschritt [h]
ks	= gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [mm/h]
wsf	= Saugspannung an der Sättigungsfront [mm]
NI	= Wasserdargebot im aktuellen Zeitschritt [mm/h]
NI_{sum}	= Summe des Wasserdargebots seit Beginn des Infiltrations-Ereignisses [mm/h]
fs	= Infiltrationsmenge zum Sättigungszeitpunkt ts
f_{pot}	= potentielle Matrix-Infiltration im aktuellen Zeitschritt [mm]
f_{potkum}	= kumulative potentielle Matrix-Infiltration im aktuellen Zeitschritt [mm]
$f_{potkum_{vor}}$	= kumulative potentielle Matrix-Infiltration des vorangegangenen Zeitschritts [mm]
A	$= ks \cdot (t_{mrx} - ts)$
B	$= wsf \cdot P_{eff} \cdot 2 + fs$

4.2.3 Makroporeninfiltration

Der nicht in die Bodenmatrix infiltrierende Rest des Wasserdargebots wird erstmals als potentieller HOF angesehen. Über die Makroporendichte wird der flächenhafte Makroporenanteil bezogen, anhand welchem die horizontale Infiltration in die Bodenmatrix mit Hilfe des Green & Ampt Ansatzes zur Berechnung radialer Sättigungsfronten nach Beven und Clarke (1986) berechnet werden kann. Dabei wird berücksichtigt, dass die von der Bodenoberfläche vertikal fortschreitende Sättigungsfront der Matrix-Infiltration die infiltrationswirksame Länge der Makroporen verringert. In einem ersten Schritt wird die Makroporeninfiltration für jeden Zeitschritt berechnet und aufsummiert. Dazu muss die Entfernung der Sättigungsfront zum Rand der Makroporen (MP_{STF}) berechnet werden. Über die Gleichung 9 wird die potentielle Makroporeninfiltration (MP_{potinf}) berechnet, anschließend wird der kleinere Wert zwischen MP_{potinf} und dem für einen Teilzeitschritt der Makroporeninfiltration zur Verfügung stehenden Anteil

des HOF nach der Matrixinfiltration (HOF_{MPant}) (Gleichung 10) bestimmt. Über die tatsächliche MP_{inf} wird der Zuwachs der gesättigten Fläche um die Makroporen für den zugehörigen Teilzeitschritt berechnet und in Abhängigkeit des gesamten infiltrierten Wasserdargebots eine neue Distanz zur Sättigungsfront berechnet, welche im nächsten Teilzeitschritt MP_{SFTvor} darstellt (LEG, 2019).

$$MP_{Infpot} = \pi \cdot MP_{laenge} \cdot P_{eff} \cdot MP - dichte \cdot \frac{MP_{SFT}^2 - MP_{SFTvor}^2}{1000000} \tag{9}$$

$$HOF_{MPant} = HOF \cdot \frac{MP_{ant}}{n_{intern}} \tag{10}$$

mit:

MP_{infpot} = potentielle Makroporeninfiltration eines Teilzeitschritts [mm]
MP_{laenge} = infiltrationswirksame Länge der Makroporen im Teilzeitschritt [mm]
MP_{dichte} = Anzahl Makroporen pro m^2 []
MP_{STF} = Distanz der Sättigungsfront vom Porenrand im aktuellen Teilzeitschritt [mm]
MP_{STFvor} = Distanz der Sättigungsfront vom Porenrand zum Ende des voran-gegangenen Teilzeitschritts
MP_{inf} = tatsächliche Makroporeninfiltration [mm]
MP_{ant} = Flächenanteil, der bei gegebener Makroporendichte (MP_{dichte}) in die Makroporen entwässern kann []
HOF_{MPant} = Für einen Teilzeitschritt der Makroporeninfiltration zur Verfügung stehender Anteil des HOF nach Matrix-Infiltration [mm]
HOF = hier: Horton'scher Oberflächenabfluss nach Matrixinfiltration [mm]
n_{intern} = Anzahl interner Rechenschritte für Makroporen- und Trockenriss-Infiltration []

4.2.4 Trockenrissinfiltration

Sofern der Tongehalt des Bodens und die aktuelle Bodenfeuchte es ermöglichen, kann der Boden über Trockenrisse verfügen, deren Tiefe bei Ereignisbegin über die Bodenspeicherfüllung bestimmt wird (Gleichungen 5a ,5b und 5c). Liegen diese und potentieller HOF nach den vorherigen Infiltrationsprozessen vor, kann die Trockenrissinfiltration in die Bodenmatrix über den Green & Ampt Ansatz berechnet werden. Auch in diesem Fall verkürzt die von der Bodenoberfläche fortschreitende Sättigungsfront die infiltrationswirksame Tiefe der Trockenrisse. Die Trockenrissinfiltration wird für jeden Teilzeitschritt berechnet und aufsummiert. In einem ersten Schritt wird die Entfernung der Sättigungsfront zum Rand der Trockenrisse (TR_{SFT}) ermittelt,

welche im Anschluss dazu verwendet werden kann die potentielle Trockenrissinfiltration zu berechnen (Gleichung 11). Ähnlich wie bei der Makroporeninfiltration wird die tatsächliche Trockenrissinfiltration (TR_{inf}) anhand des kleineren Wertes zwischen TR_{infpot} und dem Horton'schen Oberflächenabfluss nach Matrix- und Makroporeninfiltration bestimmt (LEG, 2019).

$$TR_{infpot} = \left(TR_{tiefe} \cdot TR_{laenge_{qm}} \cdot P_{eff}\right) \cdot \frac{(TR_{SFT} - TR_{SFTvor}) \cdot 2}{1000000} \tag{11}$$

mit:

TR_{infpot} = potentielle Trockenrissinfiltration eines Teilzeitschritts [mm]
TR_{tiefe} = infiltrationswirksame Tiefe der Trockenrisse im Teilzeitschritt [mm]
$TR_{laenge_{qm}}$ = Länge der Trockenrisse pro Quadratmeter [mm/m^2]
TR_{SFT} = Distanz der Sättigungsfront vom Trockenrissrand im aktuellen Teilzeitschritt
TR_{SFTvor} = Distanz der Sättigungsfront vom Trockenrissrand zum Ende des vorangegangenen Teilzeitschritts [mm]

4.2.5 Gesamtinfiltration und HOF

Nach den drei Infiltrationsprozessen, können die tatsächlichen Infiltrationen Inf_{matrix}, MP_{inf} und TR_{inf} zu Gesamtinfiltration des Zeitschritts (Inf_{tot}) aufsummiert werden, welche unter Berücksichtigung der Bodensättigungsflächenfunktion in den LARSIM-Bodenspeicher gelangt. Aus der Differenz zwischen dem Wasserdargebots und der Gesamtinfiltration eines Zeitschritts wird der anfallende HOF in den Gebietsspeicher für den schnellen Direktabfluss weitergeleitet (LEG, 2019).

4.2.6 Flächendifferenzierte Parameter des dynamischen Infiltrationsmodul

Sofern die in Tabelle 4 aufgelisteten Parameter nicht bekannt sind, können diese anhand aus zur Verfügung stehenden Bodenkarten unter Berücksichtigung der Landnutzung abgleitet oder anhand von geeigneten Pedo-Transferfunktionen über vorhandene Bodendaten geschätzt werden (Steinbrich et al., 2016, LEG, 2019).

4.3 Modellevaluierung

Zur Bewertung der Implementierung des dynamischen Infiltrationmoduls in LARSIM werden Simulationsläufe zu zwei Starkregenereignissen im Einzugsgebiet der weißen Ernz vorgenommen. Diese Simulationsläufe werden im Verlauf der Untersuchung bewertet und mit der Simulation ohne den dynamischen Infiltrationsansatz nach RoGeR (Steinbrich et al., 2016), sowie dem eigentlichen Verlauf der Abflussereignisse verglichen. Im Verlauf dieser Auswertung werden qualitative und quantitative Untersuchung zu Abflussvolumina, Abflussspitzen und dem

zeitlichen Verlauf der Abflusskurve durchgeführt. Zur Quantifizierung der Datengüte werden drei verschiedene statistische Bewertungsmaße verwendet:

- **Bestimmtheitsmaß - R^2**

  Das Bestimmtheitsmaß - R^2 - wird als der quadrierte Wert des Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson definiert und wird wie folgt berechnet (Krause et al., 2005):

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(O_i - \bar{O}\right)\left(P_i - \bar{P}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(O_i - \bar{O}\right)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(P_i - \bar{P}\right)^2}} \right)^2 \tag{12}$$

  mit:

  $O =$ Gemessener Abfluss [m^3/s]
  $P =$ Simulierter Abfluss [m^3/s]

  R^2 beschreibt das quadrierte Verhältnis zwischen der Kovarianz und den multiplizierten Standardabweichungen der beobachteten und vorhergesagten Werte. Geschätzt wird also die kombinierte Streuung gegen die einzelne Streuung der Zeitschritte, wodurch ein Großteil der Streuung durch die Vorhersage erklärt werden kann. Der Ergebnisbereich von R^2 liegt zwischen 0 (keine Korrelation) und 1 (Streuung der Simulation ist gleich der Streuung der Messung (Krause et al., 2005).

- **Vereinbarungsindex - D**

  Der Vereinbarungsindex D wurde 1981 von Willmot aufgestellt und beschreibt das Verhältnis zwischen dem mittleren quadratischen Fehlers zum potentiellen Fehler dar und wird wie folgt definiert (Krause et al., 2005):

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} \left(O_i - S_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{N} \left(\left|S_i - \bar{O}\right| + \left|O_i - \bar{O}\right|\right)^2} \tag{13}$$

  mit:

  $O =$ Gemessener Abfluss [m^3/s]
  $S =$ Simulierter Abfluss [m^3/s]

  Der Bereich von D ist ähnlich wie der von R^2 und liegt zwischen 0 (keine Korrelation) und 1 (perfekte Anpassung). Durch den mittleren quadratischen Fehler im Zähler ist D ebenfalls sehr empfindlich für Abflussspitzen und unempfindlich im niedrigen Abflussbereich.

- **Volumetrische Effizienz - VE**

  VE variiert im Bereich von 0 bis 1 und beschreibt den Anteil an Gesamtablfussvolumen der zum Vorhersagezeitpunkt simuliert wurde. VE soll besonders hilfreich beim Vergleich der Leistung von Niederschlag-Abfluss-Transferfunktionen sein und ermöglicht unabhängig davon ob es sich um steigendes oder rezessives Abflussverhalten handelt, die Abflussquantitäten einheitlich zu bewerten (Criss und Winston, 2008).

$$VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} |S_i - O_i|}{\sum_{i=1}^{N} (O_i)} \tag{14}$$

  mit:

  $O =$ Gemessener Abfluss [m^3/s]
  $S =$ Simulierter Abfluss [m^3/s]

4.3.1 Sensitivitätsanalyse & Unsicherheitsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse wird in vier verschiedene Punkte unterteilt. In einem ersten Schritt wird der gebietsabhängige Parametersatz untersucht. Zur Optimierung dieses Vorhabens werden nur jene Parameter untersucht, welche in Haag et al. (2016) als zu kalibrierende Parameter bei Hochwasser angegeben sind Tabelle 5. Anschließend werden anhand der gewonnenen gebietsabhängigen Parameter Simulationen durchgeführt, um die lokale Auswirkung von variierten Inputdaten zu untersuchen. Dazu gehören Niederschlagsdaten, Bodenwassergehaltsdaten und die teilgebietsabhängigen Parameter. Jede Simulation wird anhand der im vorherigen Unterkapitel erwähnten Bewertungsmaße bewertet. Alle Simulationen werden parallel für beide Ereignisse durchgeführt.

Tabelle 5: Übersicht zu den nach Haag et al. (2016) relevanten Teilgebietsparameter zur Kalibrierung bei Hochwasser.

Parameter	Zulässiger Wertebereich	Beschreibung
BSF	0.01-0.5	Exponent der Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion zur Anpassung des Direktabflussanteils in Abhängigkeit der Bodenspeicherfüllung
EQD	50-5000	Eichgröße für die Rückhaltekonstante des langsamen Direktabflussspeichers
EQD2	10-1000	Eichgröße für die Rückhaltekonstante des schnellen Direktabflussspeichers
EKM	0.3-3	Kalibrierfaktor für den Rauhigkeitsbeiwert im Hauptbett
EKL/EKR	0.3-3	Kalibrierfaktoren für die Rauhigkeitsbeiwerte auf den Vorländern

Nachdem durch die durchgeführten Simulationen zuverlässige Ergebnisse erzeugt werden, werden die Ergebnisse anhand der erwähnten Bestimmungsmaße bewertet. Die besten 10 Parametersets pro Bestimmungsmaß, Pegelstation und Ereignis ($10 \times 3 \times 2 \times 2 = 120$, wovon ein Teil

sich wiederholt und es im Endeffekt 77 sind) werden im weiteren Verlauf der Untersuchung zur Simulation der Prozesse verwendet. In einem nächsten Schritt werden die Parametersets dazu verwendet die Simulation unter andern Vorbedingungen durchzuführen. Dazu werden zuerst die beiden Zustandsdateien so manipuliert, dass der Bodenwassergehalt in 10 % Schritten zwischen 50 % und 150 % des Ausgangszustand variiert. Nach diesen Simulationsläufen werden die Niederschlagsdaten so manipuliert, dass der Niederschlagswert jedes Zeitschritts in 2 % Schritten zwischen 80 % und 120 % des Ausgangswertes variiert.

In einem letzten Schritt werden die landnutzungs- und bodeneigenschaftsspezifischen Parameter der UTGB Daten variiert. Dazu wurden Schritt für Schritt („One-at-a-Time“) die in Tabelle 4 abgebildeten Parameter in 2,5 %-Schritten zwischen 75 % und 125 % des Ausgangswert manipuliert. Diese werden anschließend anhand von drei auserwählten Parametersätze der gebietsabhängigen Parameter für alle Ereignisse simuliert und ausgewertet.

5 Gebietsbeschreibung

5.1 Statische Eigenschaften

In diesem Kapitel wird auf die Eigenschaften des im Laufe dieser Studie untersuchten Einzugsgebiets, der weißen Ernz, eingegangen. Der Ursprung der zur Berechnung verwendeten Daten ist in Tabelle 6 angegeben. Es ist anzumerken, dass die hier dargestellten Daten nur zur Beschreibung des Einzugsgebietes verwendet wurden und nicht zu den Eingangsdaten von LARSIM oder RoGeR gehören.

Tabelle 6: Datenherkunft der beschriebenen Daten

Datenart	Herkunft
DTM	Nationales Open-Data-Portal - `https://data.public.lu/en/`
Landnutzung	Nationales Open-Data-Portal - `https://data.public.lu/en/`
Bodentyp	Nationales Open-Data-Portal - `https://data.public.lu/en/`
Geologie	Luxemburger Straßenbauverwaltung - (Administration des ponts et chaussées)
Niederschlagsdaten	Luxemburger Wasserwirtschaftsamt - (Administration de la gestion de l'eau)
Abflussdaten	Luxemburger Wasserwirtschaftsamt - (Administration de la gestion de l'eau)
Meteorologische Daten	Luxemburger Wasserwirtschaftsamt - (Administration de la gestion de l'eau)

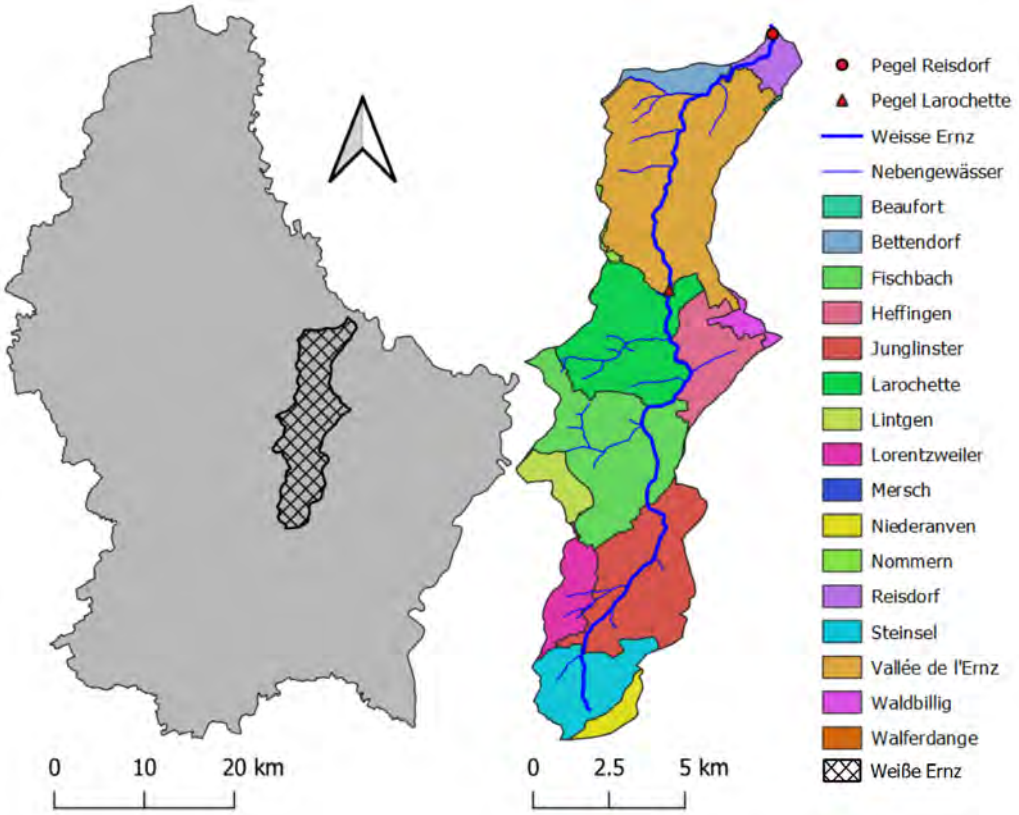

Abbildung 5: Geographische Lage des Einzugsgebiets der Weißen Ernz

Das Einzugsgebiet der Weißen Ernz befindet sich in Luxemburg und erstreckt sich über ungefähr 102 km^2 innerhalb von 16 verschiedenen Gemeinden (Abb. 5). Sie bildet sich aus zwei Wasserläufen, der „Réngelbaach“ und der „Schetzelbaach“, welche beide ihren Ursprung im südlichen Teil des Einzugsgebietes, im Grünewald haben. Auf eine Höhe von 390 m formen beide Bäche die Weiße Ernz, welche über eine Länge von 30 km bis nach Reisdorf fließt, wo sie in die Sauer, den Vorfluter der Mosel, fließt. In Larochette, rund 13 Flusskilometer vor Reisdorf befindet sich der erste Pegel des Gebietes. Ein weiterer befindet sich vor der Mündung in die Sauer, in Reisdorf.

Abbildungen 6 und 7 geben eine Übersicht zur Topographie in Form der Geländehöhen und der Hangneigung innerhalb des Gebietes. Das Einzugsgebiet reicht bis auf eine Höhe von 430 m ü NN und hat seinen tiefsten Punkt an der Mündung in die Sauer auf einer Höhe von 177 m. Dadurch ergibt sich ein maximaler Höhenunterschied von 253 Metern. Das Einzugsgebiet ist allgemein eher als steil einzuschätzen. 33 % des Gebietes haben eine Hangneigung von mehr als 50 %. 50 % des Einzugsgebietes sind dabei steiler als 30 %.

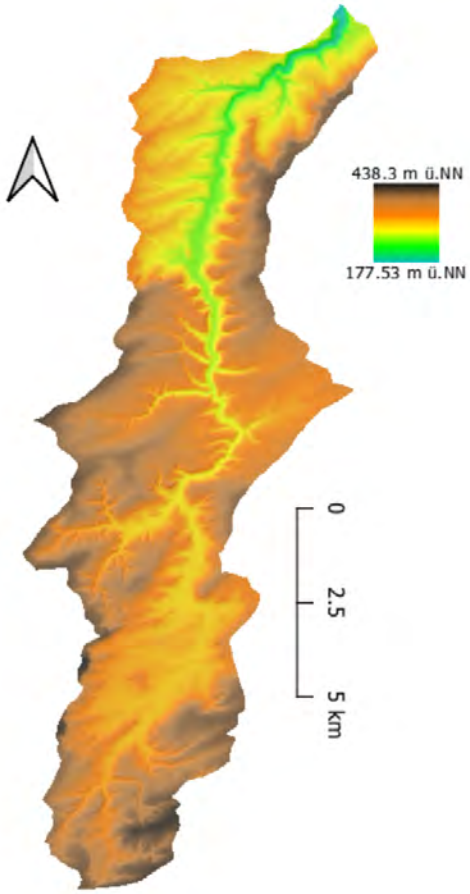

Abbildung 6: Geländehöhe des Einzugsgebiets der Weissen Ernz

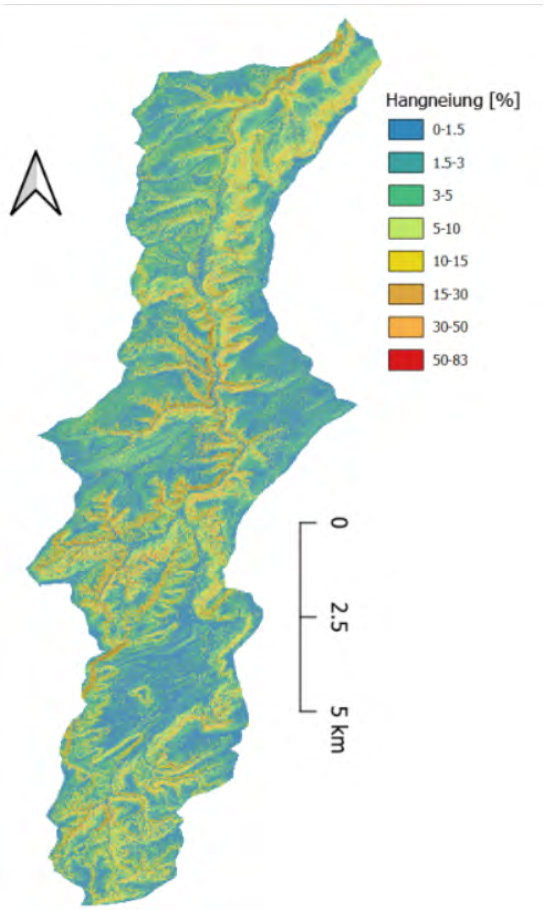

Abbildung 7: Hangneigung des Einzugsgebiets der Weissen Ernz

Die vorzufindenden Landnutzungskategorien werden in Abbildung 8 dargestellt. Die Hauptkomponente der Landnutzung bilden Agrarland und Wald, mit jeweils ungefähr 45 %. Davon

sind ungefähr 30 % Laubwälder, 12 % Nadelwälder und ein geringer Anteil Mischwälder (3 %). Von den übrigen 10 % werden 4,3 % als Siedlungsflächen ausgestellt und die restlichen Anteile gehören zum Straßennetz, natürlichen Oberflächen und stehende, sowie fließende Gewässer.

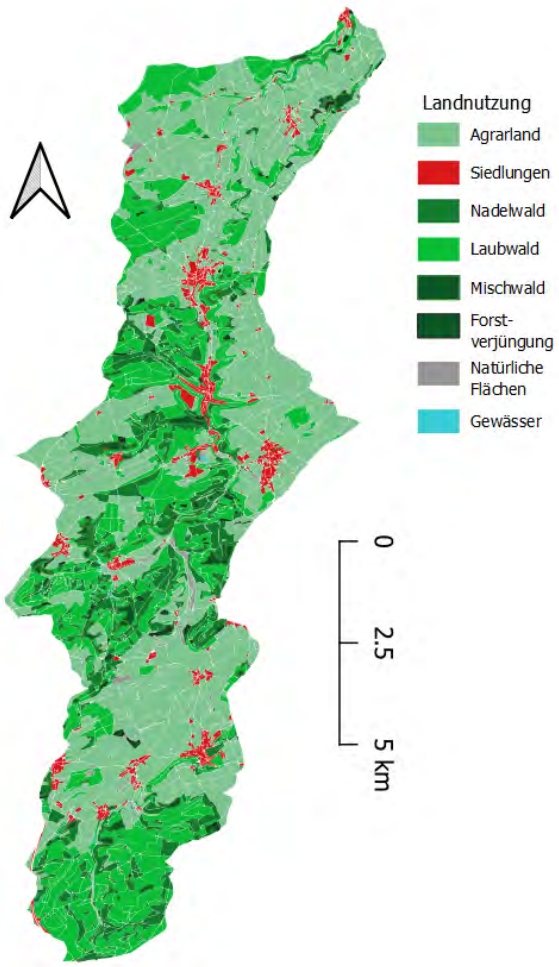

Abbildung 8: Landnutzungskategorien im Einzugsgebiet der Weißen Ernz

In Abbildung 9 ist die Geologie des Einzugsgebietes dargestellt und es lässt sich erkennen, dass das Gebiet hauptsächlich durch Unteren Jura, mit einem Anteil von 64 % geprägt, der sich aus Luxemburger Sandstein, Mergeln, Kalken und der Elvange-Formation, welche eine dunkelgraue Wechselfolge von Mergeln und teilweise sandigen Kalkbänken darstellt, zusammensetzt. Ein weiterer beträchtlicher Anteil bildet der mittlere Keuper mit 23,5 %. Dieser besteht größtenteils (19,5 %) aus Steinmergelkeuper, welcher aus bunten Mergeln mit hellgrauen Dolomitbänkchen (Steinmergel), Gips- und Kalziteinlagerungen besteht; weitere Bestandteile sind Bunter Mergel, Gipsmergelkeuper und Schilfsand. Der mittlere Keuper bildet dabei quasi das gesamte Keuper im Süden des Einzugsgebietes und die flacheren Ebenen im Norden des Einzugsgebiets. Der Restkeuper ist fast gänzlich als Unterer Keuper zu kategorisieren und besteht hauptsächlich aus Grenzdolomit, Lettenkeuper und Pseudomorphosenkeuper. Das Gerinnebett besteht hauptsächlich aus Formationen des Holozäns (5 %), also alluviale Talablagerungen, bestehend aus Kies, Sand, Schluff und Ton, und Hangschutt.

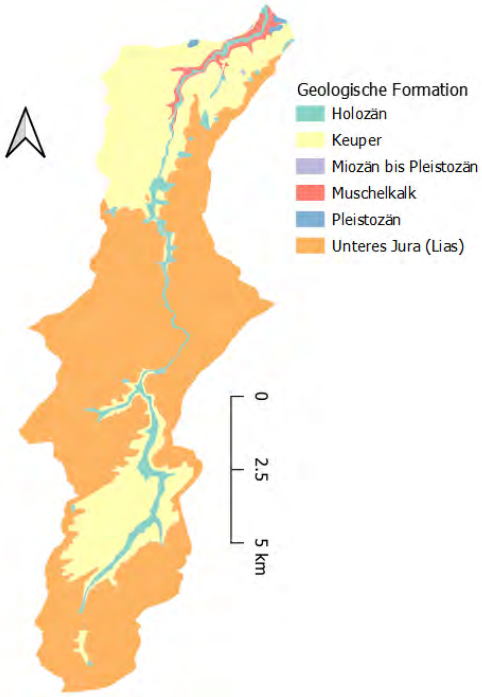

Abbildung 9: Geologische Formationen des Einzugsgebiets der Weissen Ernz

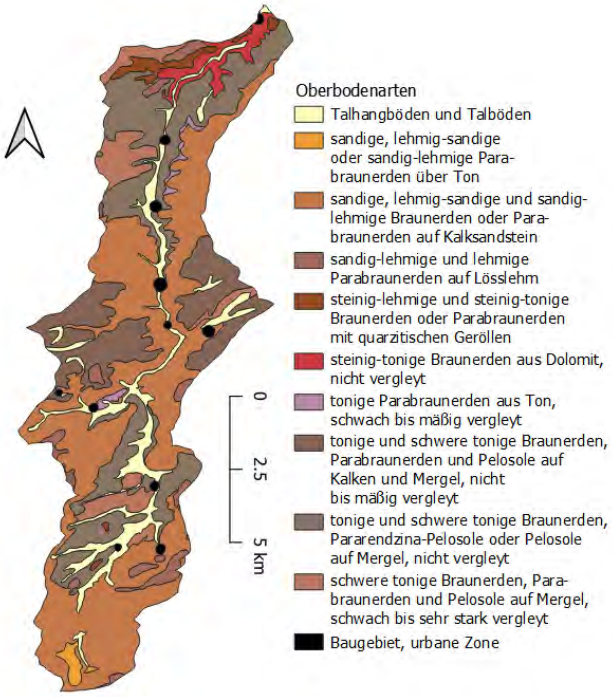

Abbildung 10: Oberbodenarten des Einzugsgebiets der Weissen Ernz

Abbildung 10 zeigt die Bodenarten des Einzugsgebietes, welche einen großen Einfluss auf die Matrixinfiltration und den Matrixfluss haben. Mit 42,5 % dominieren sandige Braun- oder Parabraunerden. Dieser befindet sich durchziehend durch das ganze Gebiet. Den zweitgrößten Anteil machen tonige und schwere tonige Braunerden, Pararendzina-Pelosole oder Pelosole auf Mergel (20,9 %) aus, welche sich hauptsächlich den Keuper Gebieten befinden. Tonige und schwere tonige Braun- und Parabraunerden bilden mit 13,2 % den drittgrößten Anteil. Diese befinden sich hauptsächlich auf der Höhe von Larochette an den Ost- und Westkuppen.

5.2 Abfluss- & Niederschlagsdaten

Wie bereits im Kapitel Problemstellung erwähnt, werden im Laufe der Studie zwei Starkniederschlagsereignisse im Gebiet der Weißen Ernz untersucht. Als Datenprodukt wurden Radolan YW Daten des DWD mit einer zeitlichen Auflösung von 5-Minuten und einer räumlichen Auflösung von 1 km^2 verwendet. Diese Daten wurden anhand mehrerer Niederschlagsstationen der ASTA (Administration des services techniques de l'agriculture) ereignisspezifisch angepasst (Haag et al., 2020). Abbildung 11 zeigt beispielhafte Ausschnitte des von Hydron korrigierten Niederschlagsproduktes.

Für den Abfluss wurden 15-Minuten Werte für beide Pegelstationen, Larochette und Reisdorf, verwendet. Abbildung 12 zeigt die beobachteten Abflussganglinien an den Pegeln Larochette und Reisdorf für die Jahre 2016 und 2018, inklusive den vom Modell zur Abflusssimulation abgeleiteten Niederschlag im 15 Minutentakt, sowie den kumulativ aufsummierten Niederschlag.

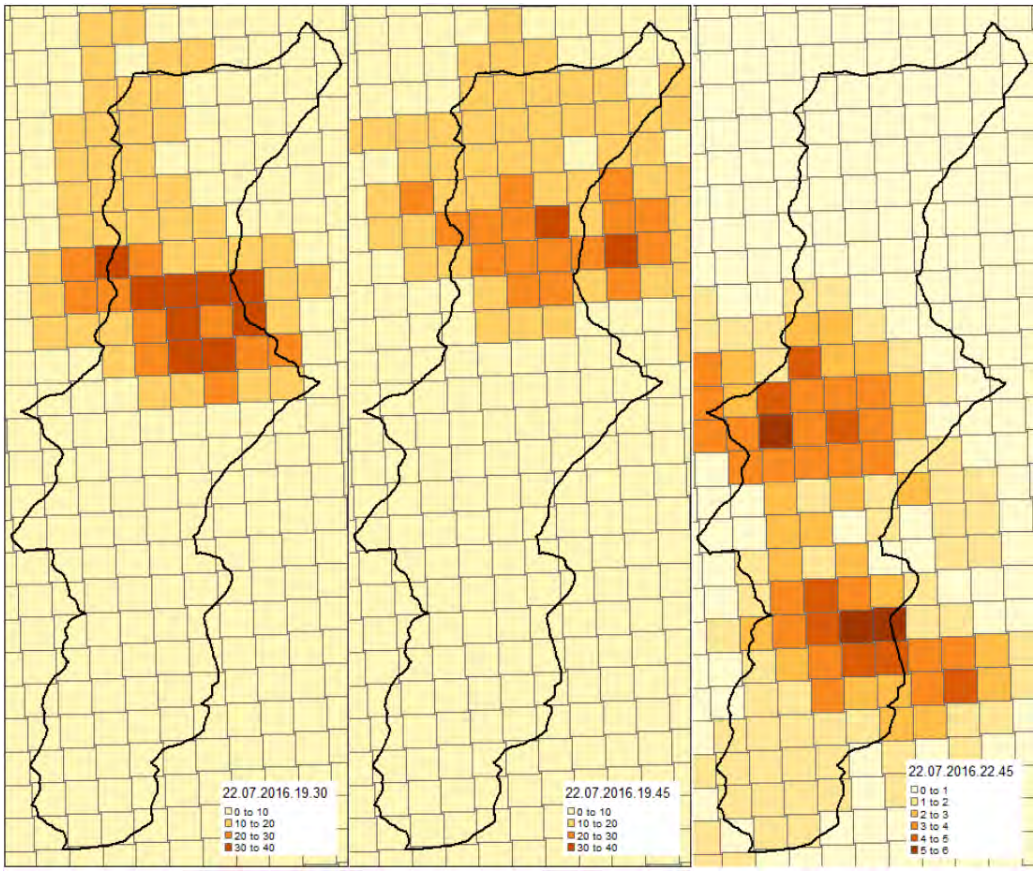

Abbildung 11: Ausschnitte des korrigierten Radardatenproduktes für das Ereignis 2016, Niederschlagsintensität in mm

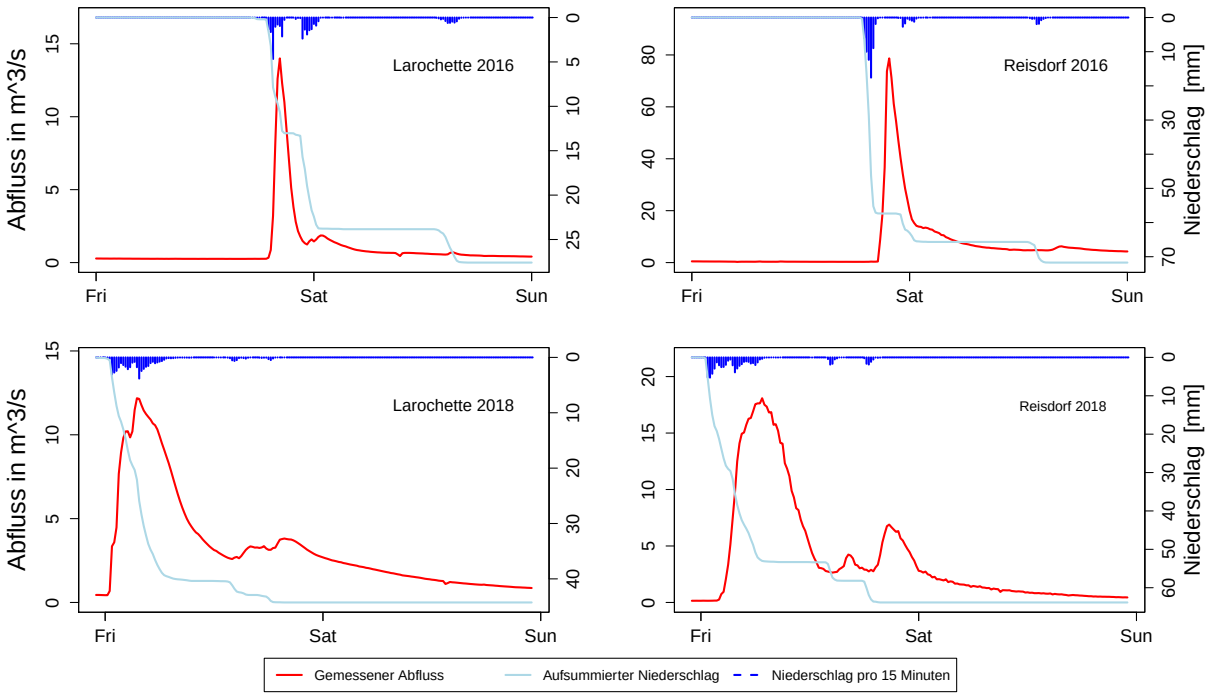

Abbildung 12: Vom Modell verwendeter beobachteter Abfluss und gebietsrelevanter Niederschlag der Pegelstationen Larochette und Reisdorf für die Jahre 2016 und 2018

6 Ergebnisse

6.1 Untersuchung der Teilgebietsparameter

Im Verlauf der Untersuchungen zur Sensibilität der teilgebietsabhänigen Parameter wurden zwei Starkregenereignisse aus den Jahren 2016 und 2018 im Einzugsgebiet der Weißen Ernz untersucht. Als Auswertungsreferenz dienen Pegelstationen in Larochette und Reisdorf. Tabelle 7 zeigt die Wertebereiche der durchgeführten Monte Carlo Simulationen. Anhand der gewonnenen Parametersätze der dritten Serie an Monte Carlo Simulationen wurden die im weiteren Verlauf der Studie angesetzten Untersuchungen durchgeführt. Insgesamt haben die sinnvollen Wertebereiche der Parameter nur bei den Parametern EDQ und EQD2 stark variiert.

Tabelle 7: Übersicht über die Parameterwertebreiche der durchgeführten Monte Carlo Simulationen des teilgebietsspezifischen Parametersatzes. Darstellung der verwendeten Parameterwertebereiche und der Anzahl an durchgeführten Monte Carlo Simulationen.

	BSF	EQD	EQD2	EKM	EKL	EKR	Sets
Wertebereich MC-Simulation 1	0.01-0.5	50-5000	10-1000	0.3-3	0.3-3	0.3-3	1000
Wertebereich MC-Simulation 2	0.15-0.45	50-2000	10-400	0.5-3	0.5-3	0.5-3	2000
Wertebereich MC-Simulation 3	0.15-0.45	50-500	13-50	0.5-2	0.5-2	0.5-2	2000

Tabelle 8: Übersicht über die Parametersensitivität der durchgeführten Monte Carlo Simulationen des teilgebietsspezifischen Parametersatzes. Einstufung der Sensitivität der Parameter in Bezug auf die Pegelstation und Bewertungsmaß (VE, R2, D) mit: 0 = nicht-sensitiv, 1 = sensitiv, 2 = leicht-sensitiv.

MC-Simulation	Station	Ereignisjahr	BSF	EQD	EQD2	EKM	EKL	EKR
1	L	2016	1-2-2	1-0-2	1-1-1	0-1-1	0-0-0	0-0-0
1	L	2018	1-0-0	1-2-0	1-1-1	0-1-1	0-0-0	0-0-2
1	R	2016	1-0-2	2-0-0	1-1-1	0-2-2	0-0-0	0-2-2
1	R	2018	2-0-0	2-0-0	1-1-1	2-1-1	0-0-0	0-2-2
3	L	2016	1-1-1	1-1-1	1-1-1	0-0-0	0-0-2	0-0-0
3	L	2018	1-1-1	1-1-1	1-1-1	0-2-2	0-0-0	2-0-2
3	R	2016	1-0-2	1-1-1	1-1-1	0-1-1	0-0-0	0-0-0
3	R	2018	1-1-1	1-1-1	1-1-1	2-2-2	0-0-0	0-0-0

Abbildung 13 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Auswertung der MC-Simulationen beider Stationen für beide Ereignisse für den Parameter EQD2. Es ist zu erkennen, dass die Station Larochette für beide Ereignisse ein Optimum, je nach Auswertungsmaß, im Wertebereich von 14-21,5 hat. Bei der Station Reisdorf hingegen befindet sich das Optimum über einer breiteren Bereich, da die effizientsten Parameterwerte zwischen 13 und 42 liegen. Anhand dieser Information und den Ergebnissen der Hornberger-Spear and Young (beispielhaft in Abbildung 14)

konnte die in Tabelle 8 aufgelisteten Einschätzungen zu der Sensitivität der einzelnen Parameter aufgestellt werden.

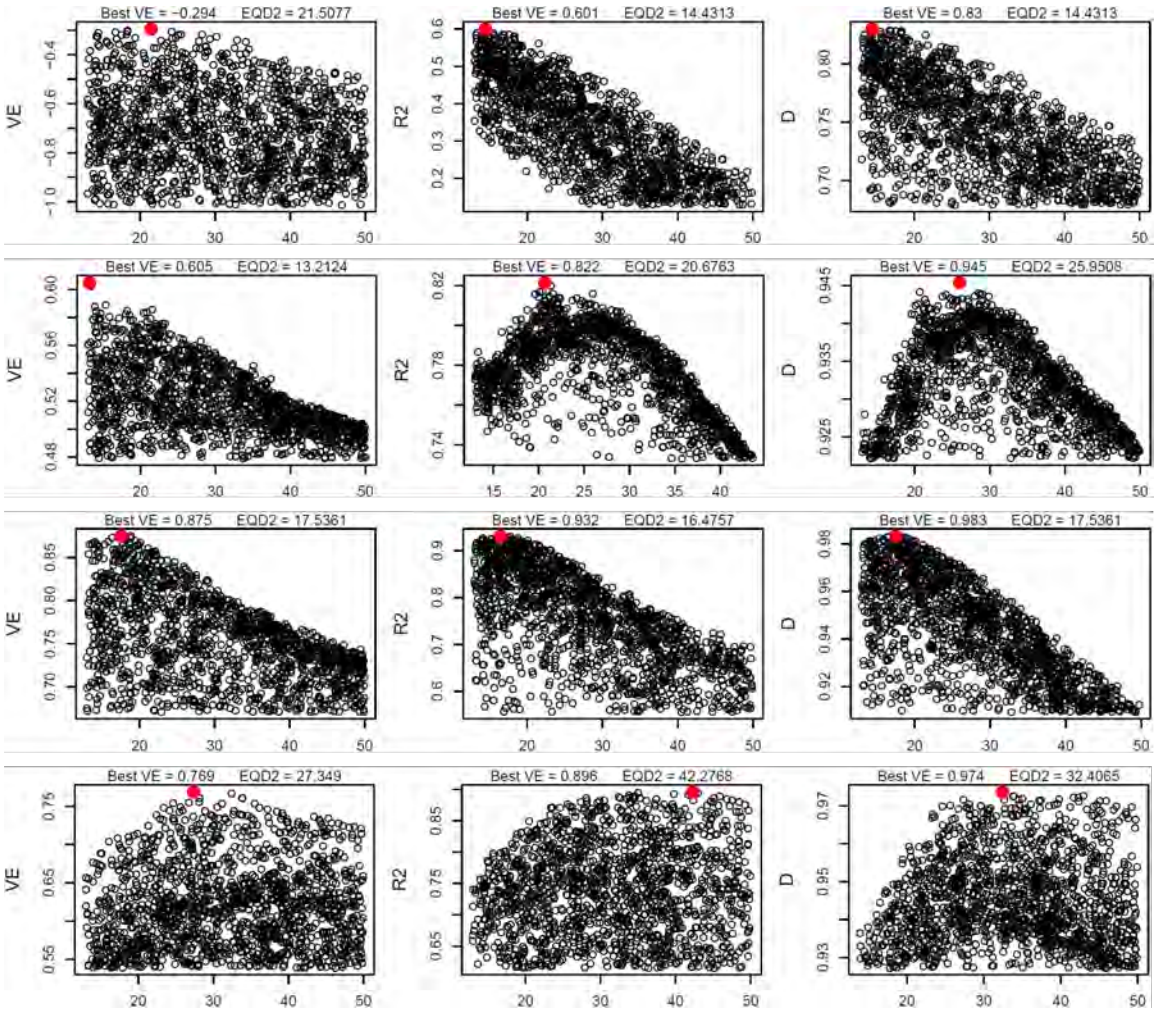

Abbildung 13: Scatterplot der Ergebnisse des dritten Monte Carlo Laufes für den Parameter EQD2. Auswertung nach: VE - R^2 - D. Zeile 1: Larochette 2016; Zeile 2: Reisdorf 2016; Zeile 3: Larochette 2018; Zeile 4: Reisdorf 2018.

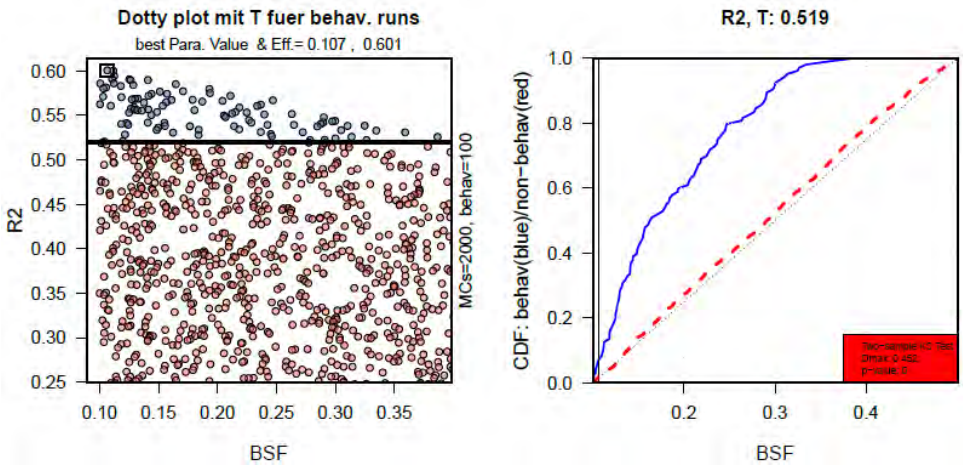

Abbildung 14: Beispielhaftes Darstellung der HSY-Scatterplots für den sensitiven Parameter BSF, bewertet nach R^2, Larochette 2016.

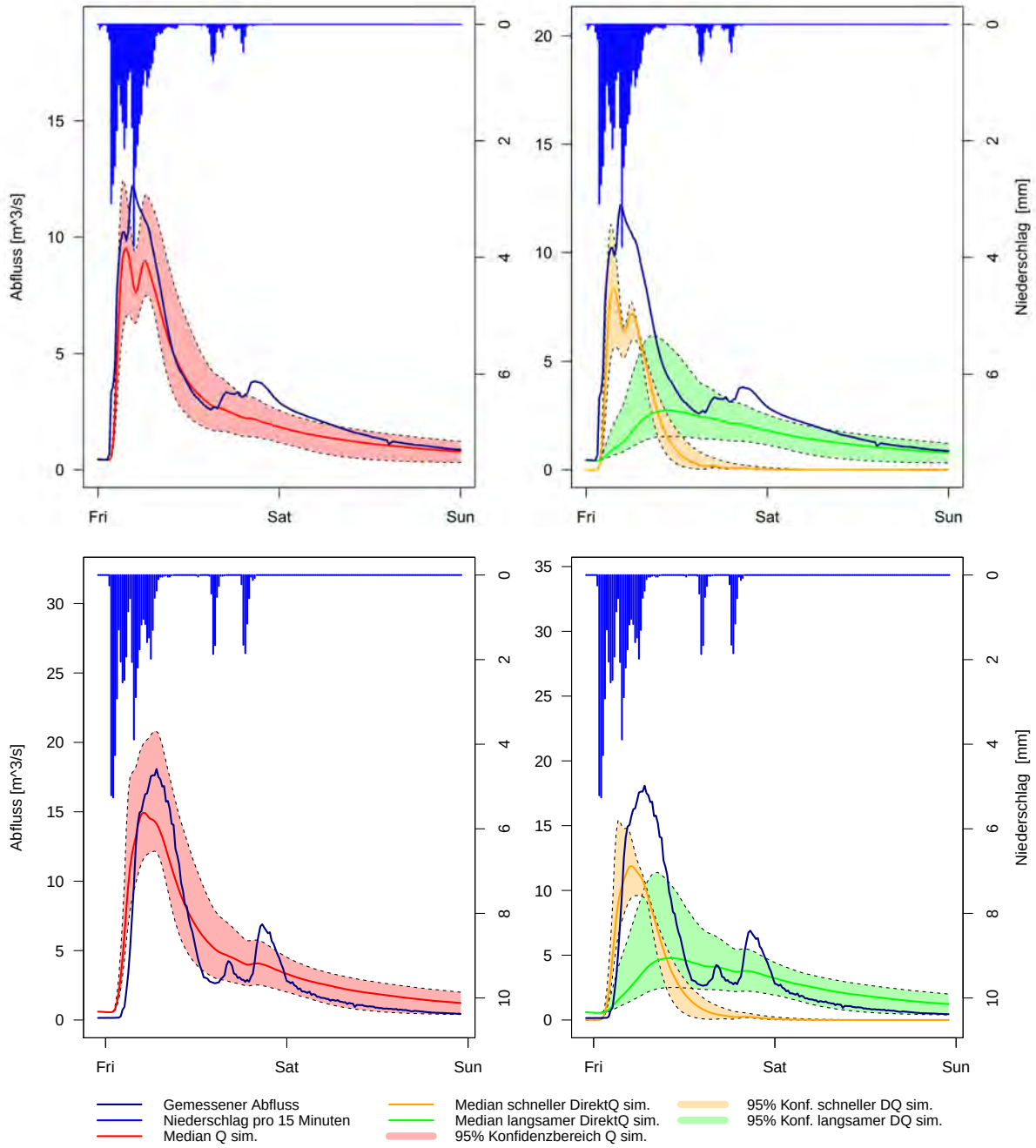

Abbildung 15: Ergebnisse der Monte Carlo Simulationen, ausgewertet nach R^2, mit gemessenem Abfluss und dem vom Modell berechneten relativen Niederschlag für die Pegelstationen: Oben: Larochette, 2018; Unten: Reisdorf, 2018 . Links: Median und 95 % Konfidenzbereich aller Simulationen. Rechts: Median und 95 % Konfidenzinterval der langsamen und der schnellen Abflusskomponente

Abbildung 15 zeigt beispielhaft für das Ereignis 2018 den 95 % Konfidenzbereich der 100 besten Simulationen nach R^2, sowie die Unterteilung der schnellen und langsamen Direktabflusskomponenten des simulierten Abflusses. Bei beiden Pegelstationen befindet sich der beobachtete Abfluss größtenteils innerhalb des Konfidenzbereichs. Besonders bei der langsamen Komponenten übersteigt des Konfidenzintervall im Bereich der Spitzenwerte den doppelten

Tabelle 9: Wertebereiche der Bewertungsmaße für die Parametersätze der 2000 MC-Simulationen, der 100 effiziensten der 2000 Parametersätze, je nach Bewertungsmaß und der 77 Parametersets, welche am meisten in unter den 100 effiziensten waren

		Larochette			Reisdorf		
		VE	R^2	D	VE	R^2	D
n=2000	2016	-1.62 : -0.29	-0.17 : 0.6	0.5 : 0.83	0.29 : 0.6	0.64 : 0.821	0.88 : 0.945
	2018	0.4 : 0.875	-0.21 : 0.931	0.83 : 0.983	0.3 : 0.77	0.33 : 0.896	0.857 : 0.973
n=100	2016	-0.32 : -0.29	0.585 : 0.6	0.827 : 0.83	0.58 : 0.6	0.812 : 0.821	0.943 : 0.945
	2018	0.867 : 0.875	0.925 : 0.931	0.982 : 0.983	0.75 : 0.77	0.887 : 0.896	0.971 : 0.973
n=77	2016	-1.23 : -0.29	0.18 : 0.6	0.65 : 0.83	0.41 : 0.6	0.71 : 0.821	0.91 : 0.945
	2018	0.55 : 0.875	0.39 : 0.931	0.89 : 0.983	0.44 : 0.77	0.36 : 0.896	0.85 : 0.973

Medianwert der Komponenten. Ebenfalls ist zu erkennen, dass bei den Simulationsläufen der Pegelstation in Larochette zwei kurz aufeinander folgende Abflussspitzen simuliert wurden, obwohl nur eine beobachtet wurde. Des Weiteren ist zu erkennen, dass beim Pegel in Larochette der Anstieg des Abflusses im Vergleich zum beobachteten Abfluss einen Zeitschritt später anfängt zu steigen, jedoch anschließend sich im Rahmen des Intervalls befindet. In Reisdorf hingegen fallen die ersten Zeitschritte des beobachteten Abfluss aus dem Intervall, da der simulierte Abfluss früher steigt als es beobachtet wurde.

Tabelle 9 zeigt einen Überblick über die Bewertungen der 2000 Parametersätze der letzten Monte Carlo Simulation, die besten 100 Sätze je nach Bewertungsmaß und die Parametersätze, welche am öftesten unter den 100 besten Sätzen waren nach Bewertungsmaß, Ereignis und Pegelstation. Es ist zu erkennen, dass besonders für die Auswertungsmaße *VE* und R^2 der Wertebereich sich drastisch verändert hat. Unter den 100 besten Parametersätzen sind die Bereiche in welchen die Bewertungsmaße sich bewegen sehr fein. Bei den 77 auserwählten vergrößern diese sich wiederum, was dadurch bedingt ist, dass die Effizienz der ausgewerteten Daten auf unterschiedliche Weisen erörtert wird. Durch diesen Ansatz sollen jedoch die Schwächen der einzelnen Bewertungsmaße überbrückt werden, um eine weniger auf eine Maß fixierte Bewertung zu ermöglichen.

In den Abbildungen 16, 17 und 18 sind beispielhaft Daten vom Ereignis von 2018 in Larochette dargestellt. Auf der jeweils linken Seite der drei Abbildungen sind die Parameterwert von BSF, EQD und EQD2 zu sehen, welche nach dem, im Titel angegebenen, Bewertungsmaß absteigend geordnet sind. Auf der rechten Seite sind die Parameterwerte beim ersten Plot nach der Differenz zwischen den Abflussscheitelwerten, beim zweiten Plot nach der zeitlichen Erscheinen des Abflussscheitels und beim dritten Plot nach dem Verhältnis der gesamten Abflussvolumen geordnet (stets Simulation zu Beobachtung). Bei der Abbildung 16 ist ein deutliches Muster bezüglich der Anordnung der BSF-Werte zu sehen. Besonders im Fall nach VE geordnet werden die BSF-Werte mit sinkender Effizienz ebenfalls kleiner. Dies lässt sich ebenfalls auf der rechten Abbildungsseite für die Bewertung nach dem gesamten Abflussvolumen erkennen. In

der Abbildung 17 ist ebenfalls ein leichtes Muster zu erkennen, da die EQD-Werte bei den drei Bewertungsmaßen zum Teil auch absteigend dargestellt sind, besonders im ersten Drittel der Werte.

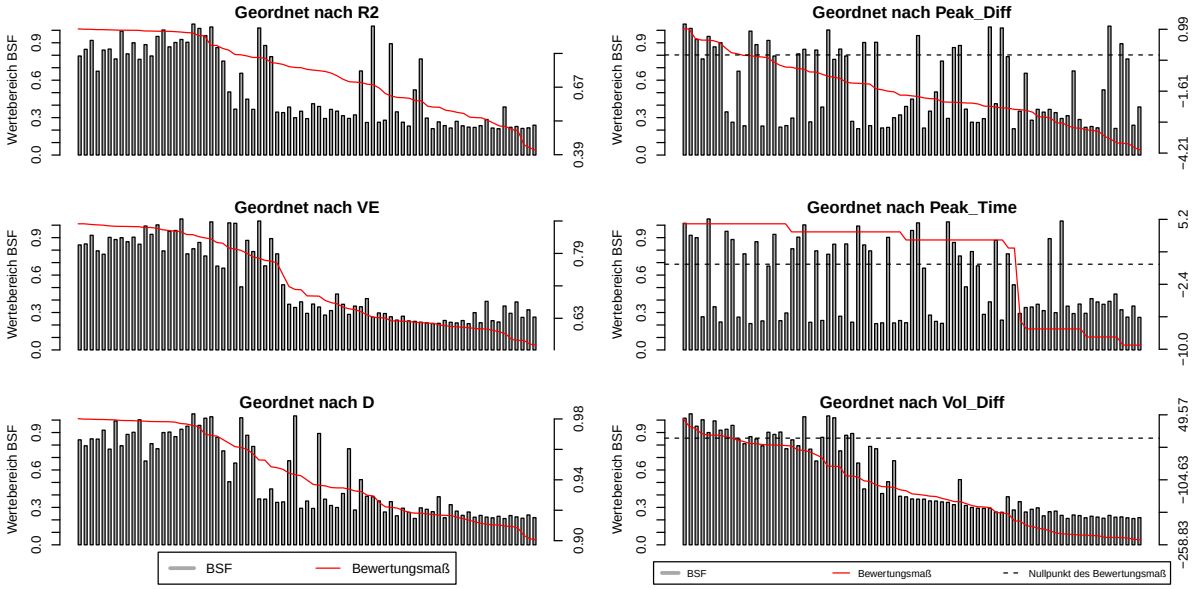

Abbildung 16: Übersicht über die 77 zur Modellierung verwendeten Parametersets für den Parameter BSF. Links: BSF-Werte geordnet nach absteigendem Bewertungsmaß R^2, VE und D. Rechts: BSF-Werte geordnet nach absteigendem Spitzenabflussverhältnis, zeitliches Eintreffen der Abflussspitze und Verhältnis der Abflussvolumen (in allen Fällen: Simulation/Beobachtung).

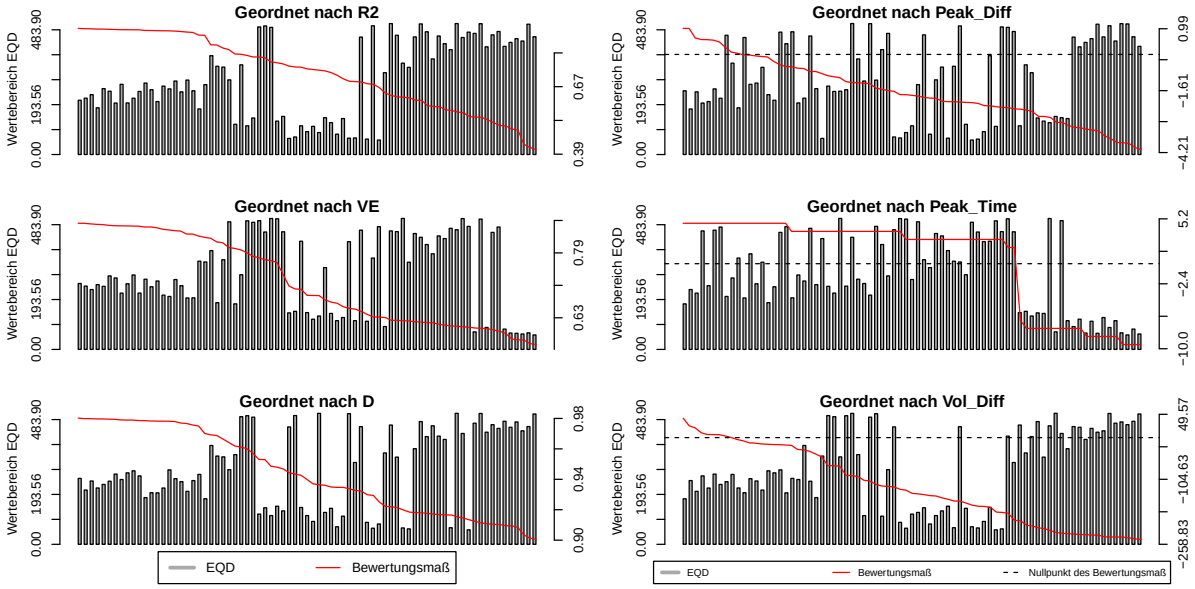

Abbildung 17: Übersicht über die 77 zur Modellierung verwendeten Parametersets für den Parameter EQD. Links: EQD-Werte geordnet nach absteigendem Bewertungsmaß R^2, VE und D. Rechts: BSF-Werte geordnet nach absteigendem Spitzenabflussverhältnis, zeitliches Eintreffen der Abflussspitze und Verhältnis der Abflussvolumen (in allen Fällen: Simulation/Beobachtung).

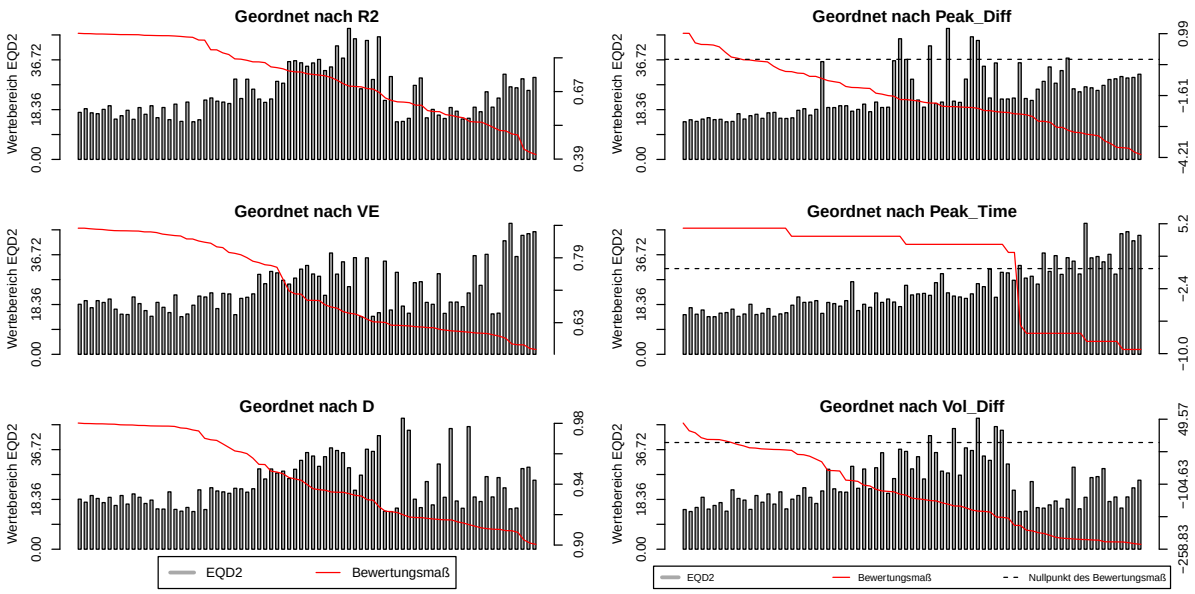

Abbildung 18: Übersicht über die 77 zur Modellierung verwendeten Parametersets für den Parameter EQD2. Links: EQD2-Werte geordnet nach absteigendem Bewertungsmaß R^2, VE und D. Rechts: BSF-Werte geordnet nach absteigendem Spitzenabflussverhältnis, zeitliches Eintreffen der Abflussspitze und Verhältnis der Abflussvolumen (in allen Fällen: Simulation/Beobachtung).

Auf der rechten Seite ist zu erkennen, dass sehr geringe EQD-Werte das Eintreffen des Abflussscheitels zeitlich verzögern. Die Sortierung nach Abflussscheitelvolumen und Gesamtvolumen weisen unter den am wenigsten effizienten Parametersets hohe Werte für EQD auf. Die EQD2-Werte, welche in Abbildung 18 dargestellt werden, haben bei den drei Plots auf der linken Seite eine deutliche Gemeinsamkeit, die darin besteht, dass die effizientesten EQD2-Werte stets zu den niedrigeren Werten gehören. Im mittleren Bereich befinden sich leicht höhere Werte und gegen Ende variieren die EQD2 Werte zwischen niedrigen und höheren Werten.

Des Weiteren ist anhand dieser drei Abbildungen zu erkennen, dass nur wenige Parametersets für dieses Ereignis ein positives Volumenverhältnis haben. Im Großteil der Teilgebietsparametersets wird für dieses Ereignis zu wenig Abfluss simuliert.

Abbildung 19 zeigt das 95 % Konfidenzinterval des simulierten Abfluss, anders als Abbildung 15, anhand der besten 77 Teilgebietsparametersets. Besonders der Konfidenzbereich für den langsamen Abfluss hat deutlich an Fläche abgenommen.

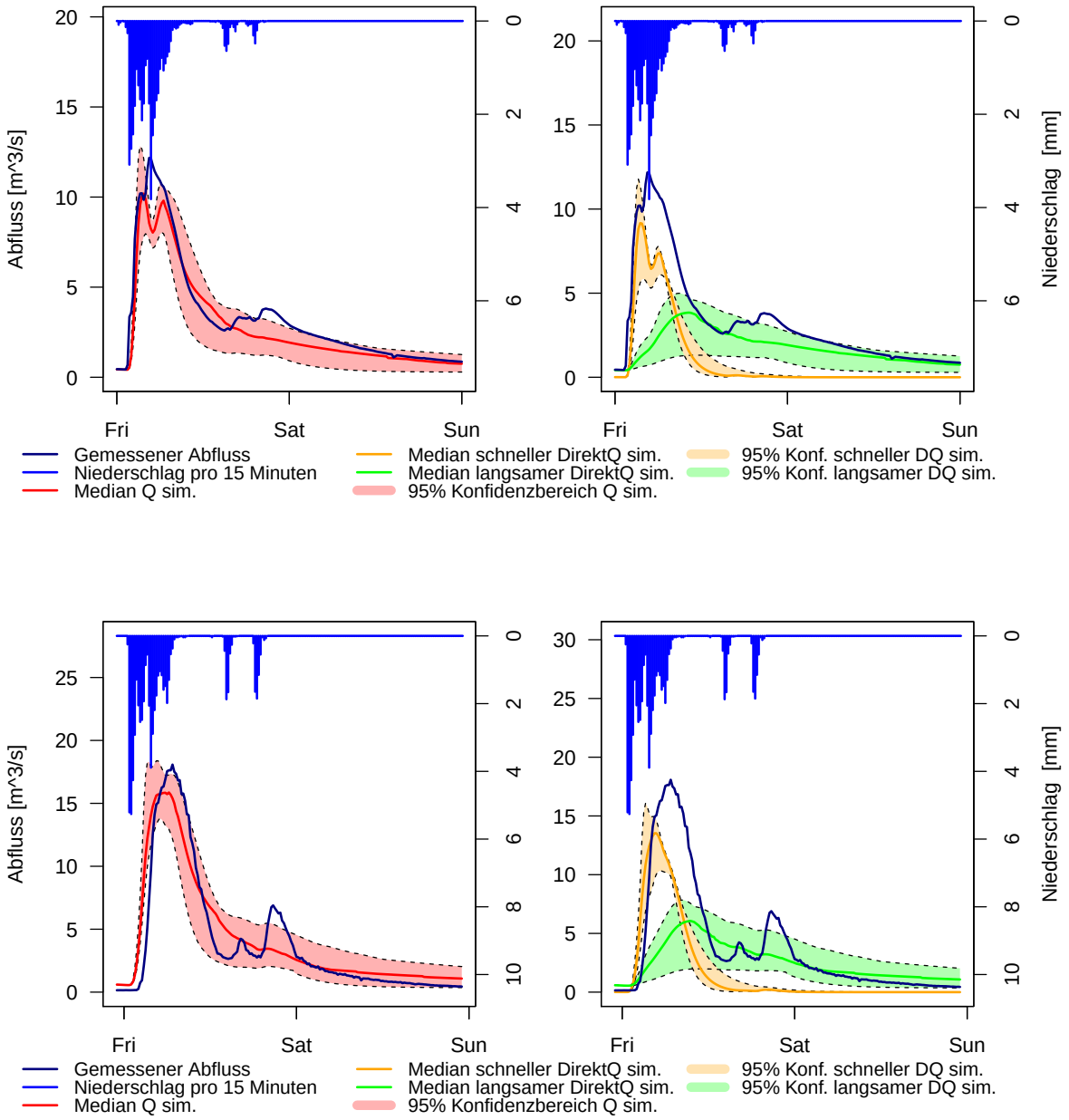

Abbildung 19: Die besten 77 Ergebnisse der letzten Monte Carlo Simulationen,ausgewertet nach R^2, mit gemessenem Abfluss und dem vom Modell berechneten relativen Niederschlag für die Pegelstationen: Oben: Larochette, 2018; Unten: Reisdorf, 2018 . Links: Median und 95 % Konfidenzbereich aller Simulationen. Rechts: Median und 95 % Konfidenzinterval der langsamen und der schnellen Abflusskomponente

6.2 Untersuchung der Unterteilgebietsparameter

Vor der Untersuchung der Unterteilgebietsparameter wurde die Anzahl der Parametersets reduziert. Für jedes Ereignis und jede Station wurden die einzelnen Parametersätze je nach Bewertungsmaß bewertet und anschließend wurden die am häufigsten vorzufindenden Parametersätze aufgrund ihres Simulationsverhaltens in drei Kategorien unterteilt (Abb. 20). Die Kategorien 1 und 3 verhalten sich, anders als Kategorie 2, beim Anstieg der ersten Abflussspitze bis zu deren Erreichen identisch. Beim Eintreffen des zweiten Niederschlagsereignis fällt der simulierte Abfluss bei der dritten Kategorie stärker ab als bei der ersten. Die zweite Kategorie reagiert, anders als die beiden anderen Kategorien, intensiver auf die zweite Niederschlagswelle und simuliert mehr Abfluss als Kategorie 3 in diesem Moment. Dennoch wird die Abflussspitze um mehr als 25% unterschritten. Die Abflussrezessionen unterscheiden sich ebenfalls deutlich bei den drei Kategorien. Allgemein können die Parametersätze der ersten Kategorie die Abflussrezession sehr gut darstellen. Kurz vor einer dritten, weniger intensiven, Niederschlagswelle fällt der beobachtete Abfluss schneller ab, als der simulierte der ersten Kategorie und steigt aufgrund des in das System eintretenden Niederschlags wieder an und übersteigt kurzfristig den simulierten Abfluss der ersten Kategorie. Die Kategorien zwei und drei können das beobachtete Rezessionsverhalten nicht gut simulieren.

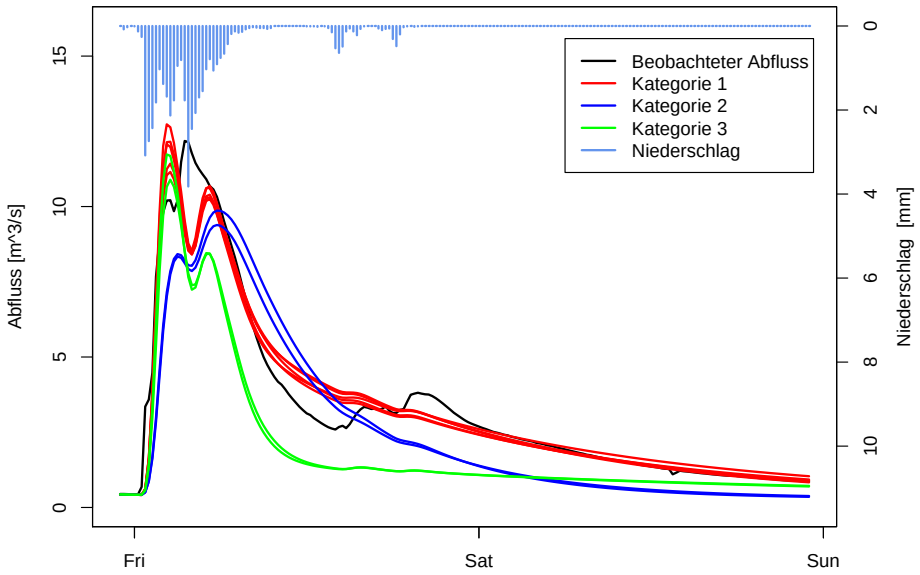

Abbildung 20: Station Larochette 2018, beispielhafte Darstellung der als am effizientesten bewerteten Gruppen an Parametersätzen

In Abbildung 21 sind die Wertebereiche der einzelnen Parameter des Teilgebietparametersatzes nach der dazugehörigen Kategorie dargestellt. Bis auf die Werte des Parameter EKM weichen die Bereiche der einzelnen Kategorien deutlich voneinander ab. Je nach Kategorie wurde anhand der Bewertungsmaße das effizienteste Parameterset ausgewählt. Die Teilgebietsparameterwerte dieser Sets sind in Abbildung 22 dargestellt. Hinsichtlich aller Parameter unterscheiden sich die Parametersätze deutlich. Die Werte der Parameter BSF, EKL und EKM des ersten Sets über-

schreiten die der anderen Sets deutlich. Für die Parameter EQD und und EQD2 bewegt sich das erste Set zwischen den beiden anderen Sets. Das zweite Set verfügt bei den Parametern EKM, EKR und EQD über die niedrigsten Werte. Das dritte Set verfügt über EKR und EQD Werte die deutlich höher als die Werte der anderen Sets sind. Für den Parameter EQD2 hat das dritte Set den geringsten Wert.

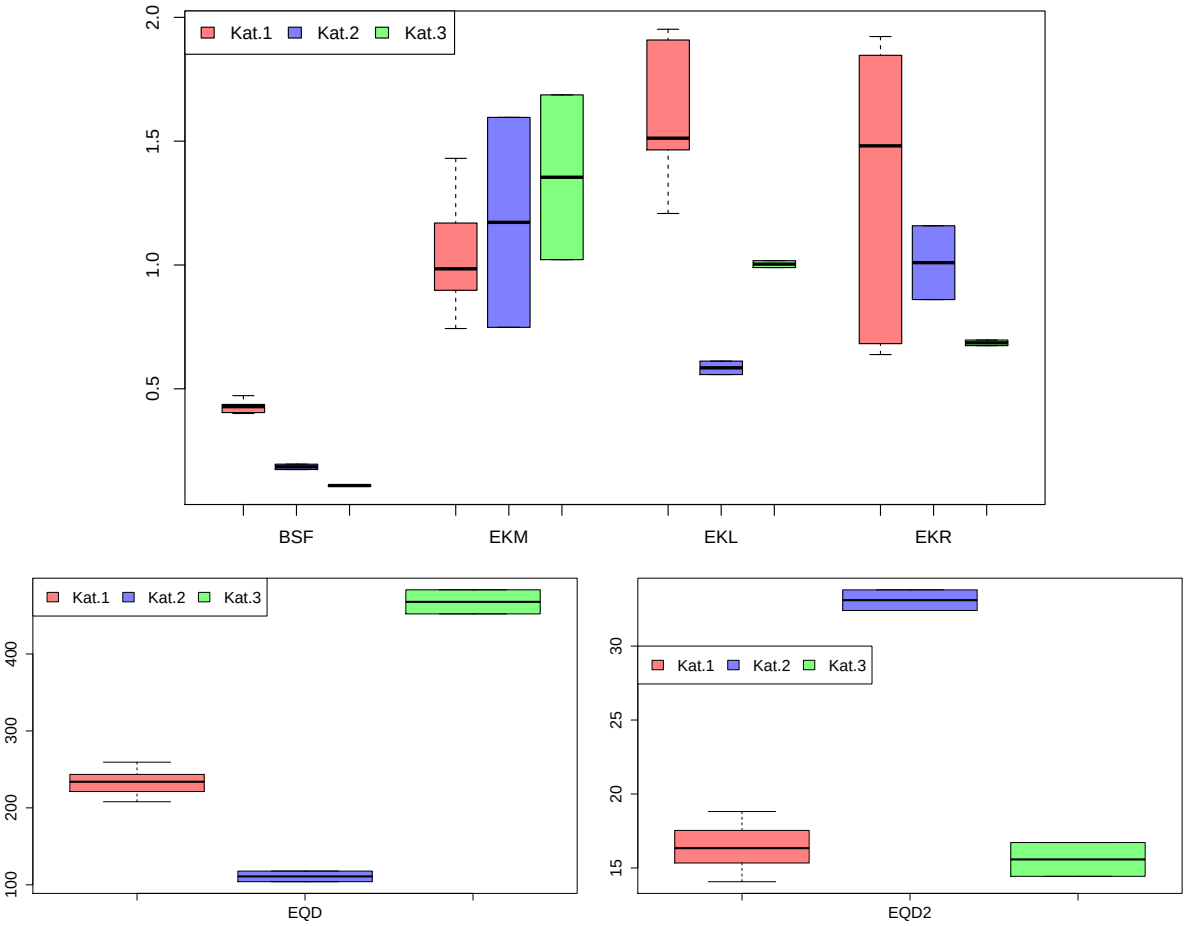

Abbildung 21: Parameterverteilung der Kategorien an auserwählten Parametersets

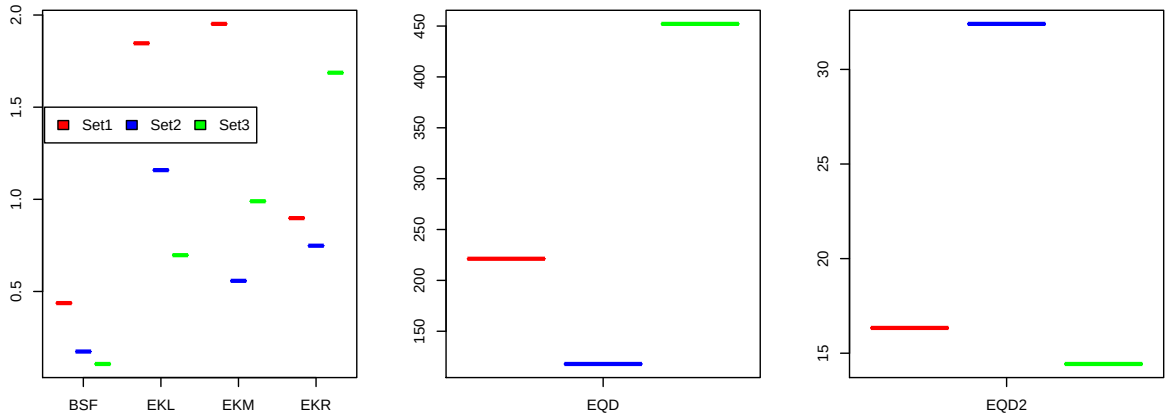

Abbildung 22: Verteilung der Parameter der über die drei Kategorien ausgewählte Parametersets.

In der Abbildung 23 sind die Bewertungen der Simulationen der Ereignisse 2016 und 2018 an

der Pegelstation in Larochette, je nach lokaler Variation der Unterteilgebietsparameter zu sehen. Jede Zelle stellt einen Modelllauf und die Farbe den Wert des Bewertungsmaßes dar. Oben rechts bei Larochette im Jahr 2016 angefangen, ist zu erkennen, dass die Parameter wsf, nFK_{Vol}, MP_{la}, MP_{di} und LK_{Vol} einen leichten Einfluss auf die Effizienz der Modelläufe haben. Werden die Werte die Parameter reduziert, sinkt in diesem Fall der Wert von R^2. Nehmen diese Werte im Bezug zum Ausgangspunkt zu, steigt auch der Wert von R^2 ebenfalls leicht an. Der Parameter k_s hat mit der Veränderungen seiner Werte einen größeren Einfluss auf die statistische Bewertung der Simulation. Die zweite Abbildung, welche die Bewertung nach R^2 für das Ereignis 2018 in Larochette zeigt, weist hingegen ein anderes Verhalten auf. Anstiege bei den Unterteilgebietsparametern wsf, nFK_{Vol}, MP_{la}, MP_{di} und LK_{Vol} reduzieren die Bewertung leicht. Der Parameter k_s hingegen verhält sich deutlich ineffizienter bei steigenden Werten, weist jedoch in den niedrigeren Bereichen eine höhere Effizienz auf. Bei der Bewertung nach D zeigt sich ein ähnliches Bild. Nach VE hingegen verändert sich das Bild leicht. Das Ereignis von 2018 in Larochette zeigt für die Parameter wsf, MP_{di} weisen in den stärker differenzierten Bereich eine ähnliche Abweichung auf und sind nahe der Mitte im besten Bereich. Für k_s sinkt die Effizienz, anders als bei D und R^2, bei niedrigeren Werten stärker ab als bei den höheren Werten.

Abbildungen 24 und 25 zeigen die Verteilung des Parameters wsf und die Bewertung der Parametersets anhand von R^2, D und VE im Verlauf der Veränderung von wsf durch die Faktoren 0,75 bis 1,25 an den Pegelstationen Larochette und Reisdorf für die Ereignisse 2016 und 2018. Die durchgezogenen Linien stellen die Bewertungen der Ereignisse aus dem Jahr 2016 für die drei Teilgebietsparametersets, die gestrichelten hingegen jene aus dem Jahr 2018. Die Farben Rot, Blau und Grün gehören zu den Simulationsergebnissen an der Station in Larochette und die Farben Pink, Türkis und Khaki zu den Simulationsergebnissen an der Station in Reisdorf. Die Ergebnisse aus Abbildung 23 lassen sich in den Abbildungen 24 und 25 deutlicher für die einzelnen Parameter erkennen (in diesem Fall k_s).

Für das Ereignis von 2016 in Larochette ist zu erkennen, dass die drei Bewertungsmaße die drei Teilgebietsparametersets ähnlich bewerten, sodass Set 3 unabhängig vom Bewertungsmaß effizienter ist, als die darauf folgenden Sets 1 und 3. Für das Ereignis aus dem Jahr 2018 stellt das Set 3 das am schwächsten bewertete Teilgebietsparameterset dar. Maximale Effizienz erreicht es in den stark reduzierten Wertebereichen von k_s, fällt jedoch mit steigendem Wertebereich konstant weiter ab. Das Set 2 fällt ebenfalls mit steigendem Wertebereich ab, jedoch nicht ganz so stark wie des beim dritten Set der Fall ist. Das erste Parameterset variiert in seiner Effizienz nach R^2 nur leicht und zeigt den effizientesten Wertebereich bei um 10% geringeren Werten im Bezug zum Ausgangswert. Für den Pegel in Reisdorf verhalten sich Ergebnisse aus dem Jahr 2016 sehr ähnlich. Lediglich im Bereich zwischen um 5 % und um 20 % erhöhten Werte driften die drei Teilgebietsparametersets leicht auseinander. Für die Ereignisse von 2018 sieht dies jedoch anders aus. Beim Parameterset 3 wird die maximale Effizienz nach R^2 in den sehr reduzierten Wertebereichen von k_s erreicht, wohingegen das zweite Set im ersten Drittel der un-

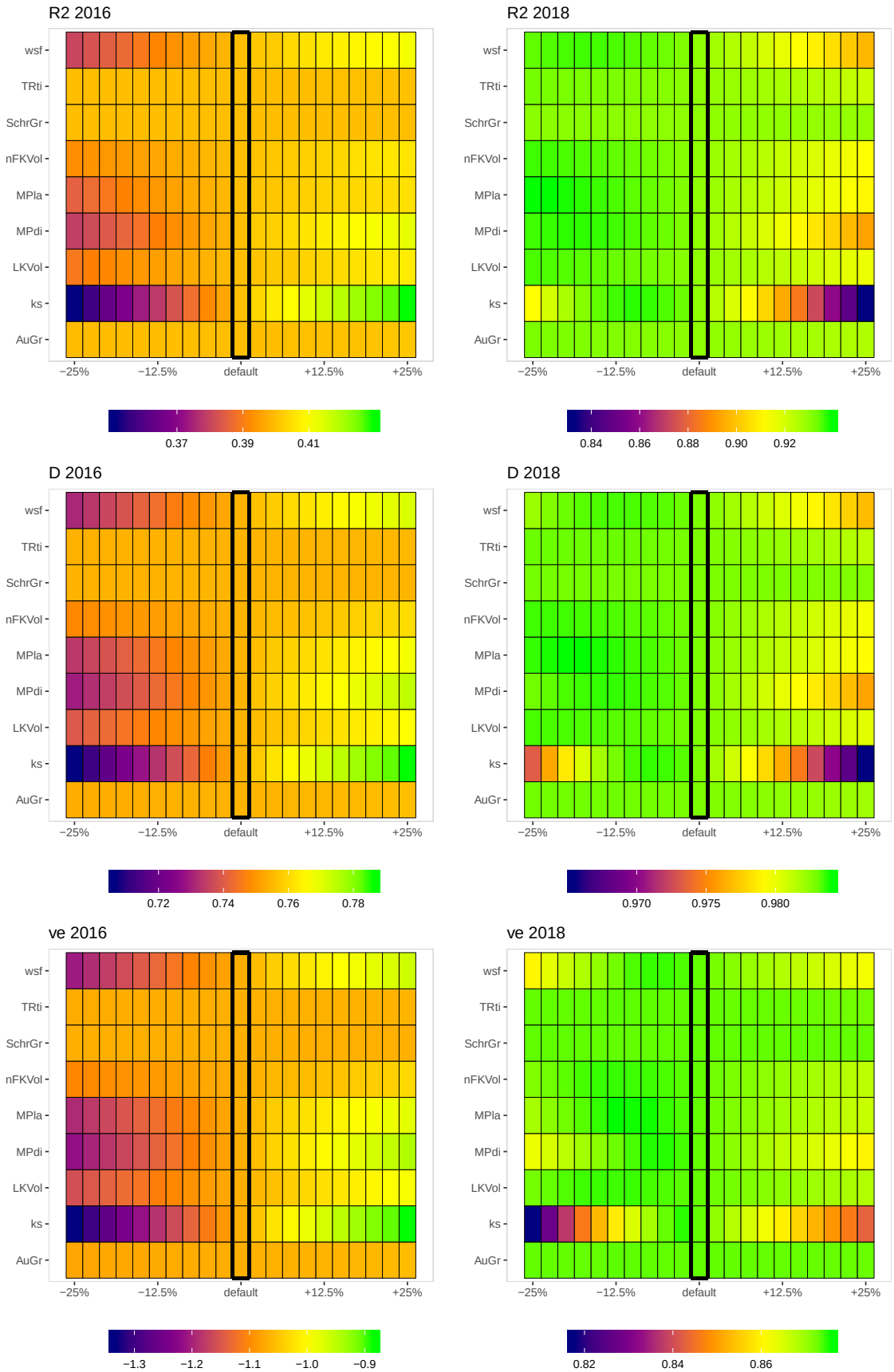

Abbildung 23: Darstellung der Effizienz nach R^2, D und VE zu den Simulationen der variierten Unterteilgebietsparameter an der Pegelstation Larochette für das Parameterset 1 und die Jahre 2016 und 2018.

tersuchten Wertebereiche leicht ansteigt, bei -10% sein Maximum erreicht und wieder abfällt. Das erste Teilgebietsparameterset verhält sich ähnlich wie Set 2, nur, dass die Effizienz nach R^2 um ungefähr 13% niedriger ist.

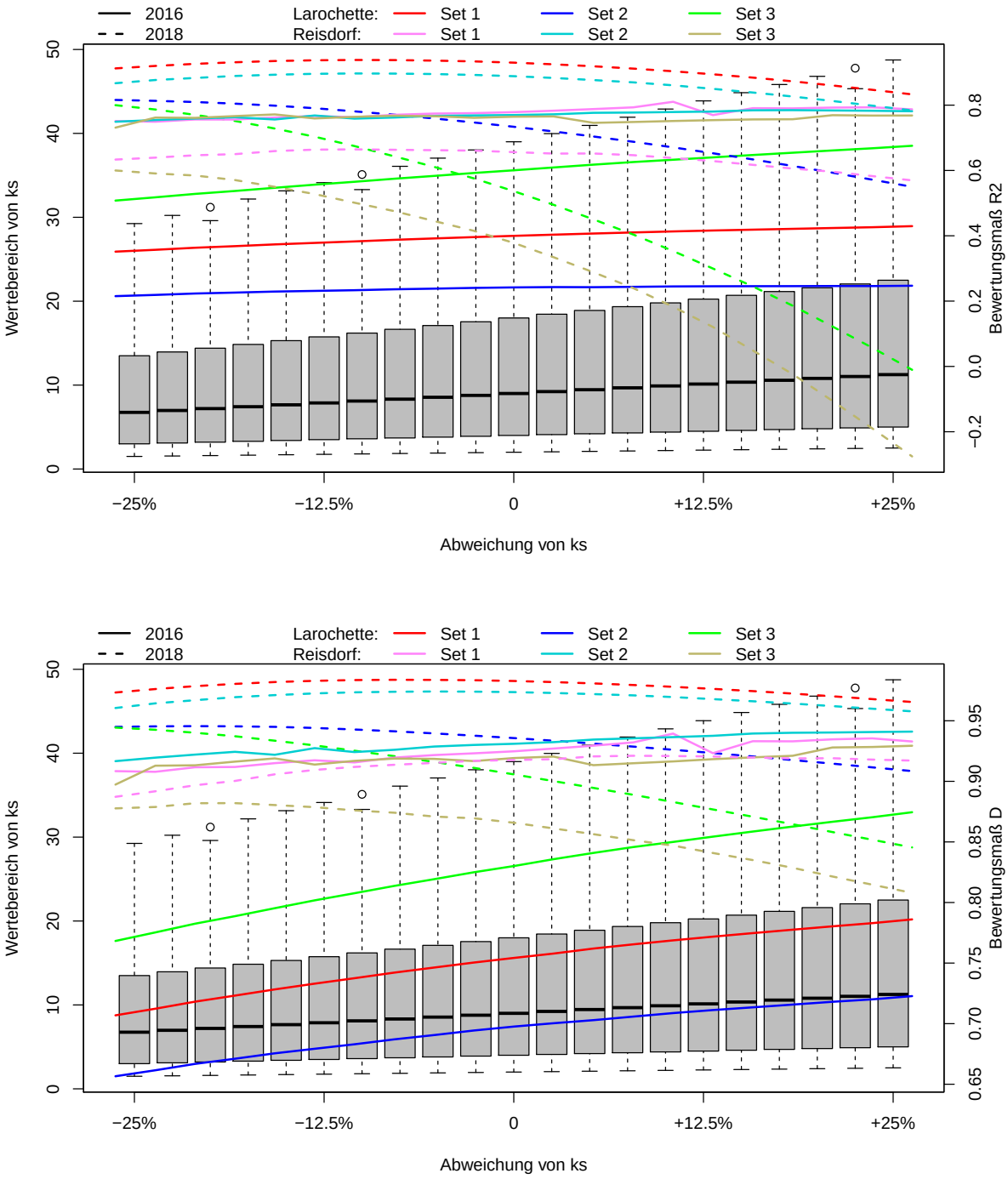

Abbildung 24: Darstellung des Parameters $\mathbf{k_s}$, manipuliert über die Faktoren 0,75 - 1,25 in 0,025 Schritten (Boxplot). Bewertung der auserwählten Parametersets über das Bewertungsmaß R^2 (oben) und D (unten). Die durchgezogenen Linien stellen die Bewertung von Ereignissen aus dem Jahr 2016 dar; die gestrichelten Linien stellen die Bewertung von Ereignissen aus dem Jahr 2018 dar. Die Farben Rot, Blau und Grün stellen Ereignisse an der Station in Larochette dar; die Farben Pink, Türkis und Khaki stellen Ereignisse an der Station in Reisdorf dar.

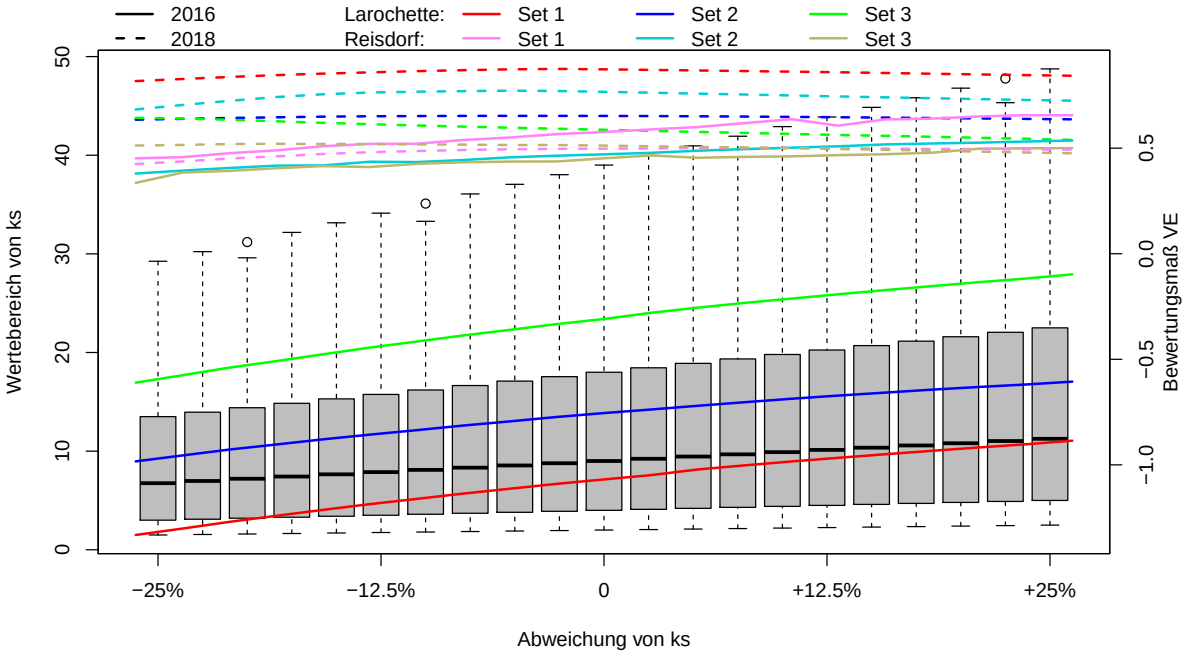

Abbildung 25: Darstellung des Parameters $\mathbf{k_s}$, manipuliert über die Faktoren 0,75 - 1,25 in 0,025 Schritten (Boxplot). Bewertung der auserwählten Parametersets über das Bewertungsmaß VE. Die durchgezogenen Linien stellen die Bewertung von Ereignissen aus dem Jahr 2016 dar; die gestrichelten Linien stellen die Bewertung von Ereignissen aus dem Jahr 2018 dar. Die Farben Rot, Blau und Grün stellen Ereignisse an der Station in Larochette dar; die Farben Pink, Türkis und Khaki stellen Ereignisse an der Station in Reisdorf dar.

Im Vergleich zu den Auswertungen nach D und VE aus den Abbildungen 24 und 25 verändern sich die erwähnten Muster nur geringfügig. Das Effizienzverhältnis der drei Sets für die Station in Larochette im Jahr 2016 ist in den drei Fällen identisch. Für die Station in Reisdorf zum selben Ereignis ebenfalls, auch wenn zu erkennen ist, dass nach D das Unterteilgebietsparameterset 2 effizienter ist als die beiden anderen Sets und für VE das erste Set als leicht effizienter dargestellt wird.

Tabelle 10 gibt eine Übersicht über alle Ereignisse, Unterteilgebietsparameter und Teilgebietsparametersets zu den initialen Bewertungswerten, den über die lokale OAT Untersuchung ergebenen maximalen Bewertungswerten und um wie weit die Unterteilgebietsparameter zur Erreichung des Maximalwerts manipuliert wurden. Angefangen mit dem Ereignissen aus dem Jahr 2016, kann man zu den Daten bezüglich des Pegels in Larochette sagen, dass sich für die Teilgebietsparametersets 1 & 2 die Effizienz kaum vom Initialwert unterscheidet, beim Set 3 hingegen ein wenig. Das Set 2 zeigt eine gewisse Variabilität bezüglich der verbesserten Werten der UTGB-Parameter, die andern beiden Sets hingegen verbessern ihre Effizienz mit um 25 % höheren Werten. Am Pegel Reisdorf steigt nur die Effizienz des ersten Sets für verschiedene UTGB-Parameter, im Vergleich zu den beiden weiteren Sets. Beim ersten und zweiten Set befinden sich die effizientesten Werte der UTGB-Parameter stets in höheren Wertebereichen als beim Initialwert. Lediglich das dritte UTGB-Parameterset weist auch tiefere Werte

Tabelle 10: Auswertung der Simulation der UTGB Parametersätze anhand der drei auserwählten Teilgebietsparametersets ausgewertet nach R^2.

Parameter-	Larochette 2016			Reisdorf 2016			Larochette 2018			Reisdorf 2018		
Set 1	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%
AuGr	0.400	0.401	25	0.779	0.782	25	0.930	0.0.932	-25	0.656	0.676	25
k_s	0.400	0.429	25	0.779	0.810	10	0.930	0.938	-10	0.656	0.665	-10
LK_{Vol}	0.400	0.407	25	0.779	0.810	25	0.930	0.937	-25	0.656	0.664	20
MP_{di}	0.400	0.413	25	0.779	0.810	12.5	0.930	0.938	-20	0.656	0.660	7.5
MP_{la}	0.400	0.405	25	0.779	0.812	15	0.930	0.939	-22.5	0.656	0.661	15
nFK_{Vol}	0.400	0.406	22.5	0.779	0.789	25	0.930	0.937	-25	0.656	0.661	15
SchrGr	0.400	0.400	22.5	0.779	0.779	25	0.930	0.931	-25	0.656	0.657	25
TR_{ti}	0.400	0.400	25	0.779	0.780	25	0.930	0.933	-25	0.656	0.673	25
wsf	0.400	0.411	25	0.779	0.811	10	0.930	0.937	-17.5	0.656	0.663	10
Set 2	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%
AuGr	0.242	0.242	-12.5	0.770	0.772	25	0.734	0.755	-25	0.889	0.889	22.5
k_s	0.242	0.247	25	0.770	0.785	17.5	0.734	0.816	-25	0.889	0.897	-10
LK_{Vol}	0.242	0.243	-25	0.770	0.778	25	0.734	0.772	-25	0.889	0.893	-25
MP_{di}	0.242	0.242	-2.5	0.770	0.783	22.5	0.734	0.795	-25	0.889	0.895	-15
MP_{la}	0.242	0.246	-22.5	0.770	0.782	22.5	0.734	0.788	-25	0.889	0.896	-25
nFK_{Vol}	0.242	0.247	25	0.770	0.775	25	0.734	0.775	-25	0.889	0.894	-25
SchrGr	0.242	0.242	25	0.770	0.770	25	0.734	0.737	-25	0.889	0.889	-25
TR_{ti}	0.242	0.242	-22.5	0.770	0.770	2.5	0.734	0.758	-25	0.889	0.889	-10
wsf	0.242	0.242	-2.5	0.770	0.782	25	0.734	0.803	-25	0.889	0.893	-12.5
Set 3	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%
AuGr	0.601	0.605	25	0.765	0.770	25	0.537	0.569	-25	0.378	0.381	-15
k_s	0.601	0.676	25	0.765	0.772	-15	0.537	0.8	-25	0.378	0.600	-25
LK_{Vol}	0.601	0.628	25	0.765	0.769	-10	0.537	0.628	-25	0.378	0.439	-25
MP_{di}	0.601	0.648	25	0.765	0.771	-20	0.537	0.692	-25	0.378	0.507	-25
MP_{la}	0.601	0.633	25	0.765	0.772	25	0.537	0.667	-25	0.378	0.472	-25
nFK_{Vol}	0.601	0.614	25	0.765	0.770	12.5	0.537	0.636	-25	0.378	0.445	-25
SchrGr	0.601	0.601	25	0.765	0.765	25	0.537	0.542	-25	0.378	0.380	-25
TR_{ti}	0.601	0.603	25	0.765	0.765	25	0.537	0.574	-25	0.378	0.386	-20
wsf	0.601	0.641	25	0.765	0.770	-20	0.537	0.703	-25	0.378	0.492	-25
ohne dyn. inf.	0.049			0.627			0.616			0.784		

auf. Bei dem Ereignis aus dem Jahr 2018 ist im Bereich des Pegels in Larochette die Effizienz des ersten Sets von sich aus nach R^2 schon hoch mit einem Wert von 0,93. Dementsprechend verändern die variierten UTGB-Parameter die Ergebnisse auch nur geringfügig. Bei dem zweiten und dritten Set finden sich die besseren Bewertungswerte jedes mal bei den um 25 % niedrigeren UTGB-Parameterwerten. Das dritte Teilgebietsparameterset zeigt dabei die größten Verbesserungen durch veränderte UTGB-Parameterwerte. Durch einen um 25 % geringeren k_s steigt der R^2-Wert um fast 50 % von 0,537 auf 0,8. Die Pegelstation in Reisdorf weist die größte Effizienz beim zweiten Teilgebietsparameterset auf. Diese Werte werden durch variierte UTGB-Parameter auch nur geringfügig nach R^2 verbessert. Auf das erste Set haben die manipulierten UTGB-Parameter ebenfalls keinen Effekt. Das am schlechtesten abschneidende Set ist das dritte, bei welchem sich die Effizienz durch geringere UTGB-Parameterwerte kaum oder bis zu 60 % im Fall vom Parameter k_s erhöht.

Tabelle 11: Einschätzung welches Teilgebietsparameterset am besten für das jeweilige Ereignis eingeschätzt wurde

Bewertungsmaß	Larochette 2016	Reisdorf 2016	Larochette 2018	Reisdorf 2018
R^2	Set 3	Set 1	Set 1	Set 2
VE	Set 3	Set 1	Set 1	Set 2
D	Set 3	Set 1/2	Set 1	Set 2

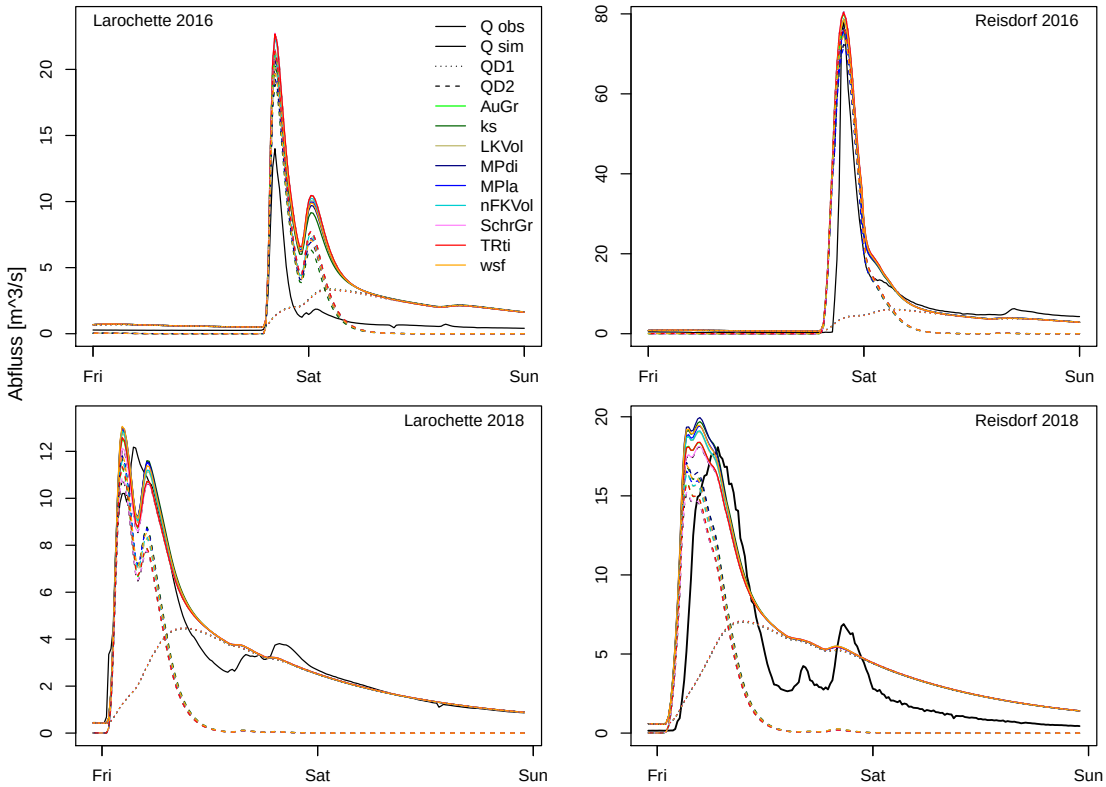

Abbildung 26: Darstellung des beobachteten Abfluss, Ausgangssimulation von Unterteilgebietsparameterset 1 und den nach R^2 effizientesten Parameterwerten

Die Abbildungen 26, 27 und 28 zeigen die besten simulierten Abflussganglinien pro Parameter und pro Teilgebietsparameter, sowie den dazugehörigen schnellen und langsamen Direktabfluss. Von der ersten Kategorie zur dritten hin steigt der Anteil der langsamen Komponente am Gesamtabfluss stetig an. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Variation einzelner UTGB-Parameter kaum, bis nur einen geringen Einfluss auf die Werte des langsamen Abflusses. Besonders bei dem Ereignis von 2018 sind Abweichung der Abflussspitzen von bis zu 25% zu erkennen (Abb. 28 Abflussspitze der TR_{ti} zu k_s). Abbildung 26 zeigt die Simulationen, welche anhand des ersten Teilgebietsparameterset durchgeführt wurden. Dieses Set erzielt seine besten Ergebnisse für das Ereignis von 2016 in Reisdorf und für das Ereignis 2018 in Larochette. Die Abflussspitzen werden vom Volumen her gut getroffen und die Abflussrezession stimmt über einen großen Bereich mit der gemessenen Ganglinien überein. Die Abbildung 27 zeigt das Gleiche für die Daten aus dem zweiten Teilgebietsparameterset. Die Abflussspitzen für das

Ereignis von 2016 in Larochette und 2018 in Reisdorf werden gut getroffen, auch wenn diese in Reisdorf stetig unterschätzt werden. Bei Reisdorf 2018 wurde anhand dieses Sets auch die beste Abflussrezession erreicht. Abbildung 28 zeigt die Abflussganglinien für das dritte Teilgebietsparameterset. Dieses war lediglich beim Ereignis von 2016 in Larochette das effizienteste Set. Für dieses Ereignis wurde am Pegel Reisdorf die Abflussspitze ebenfalls gut simuliert, jedoch wird die Abflussmenge bei der Abflussrezession deutlich unterschätzt.

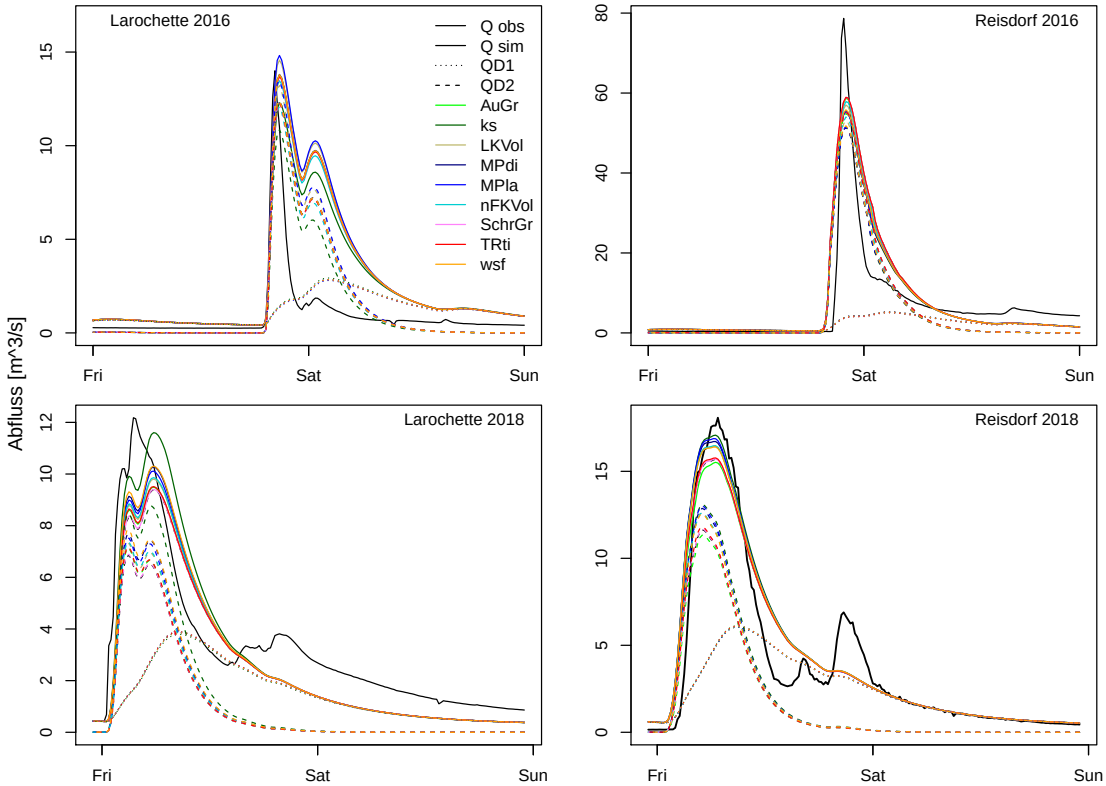

Abbildung 27: Darstellung des beobachteten Abfluss, Ausgangssimulation von Unterteilgebietsparameterset 2 und den nach R^2 effizientesten Parameterwerten

In der Abbildung 29 sind die Simulationen der einzelnen Teilgebietsparametersets noch einmal gegen die Abflusssimulation von LARSIM ohne das dynamische Infiltrationsmodul dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Simulation des Abflusses anhand des zweiten Parametersets sich teilweise ähnlich wie die Abflussganglinie des Modells ohne das dynamische Infiltrationsmodul verhält.

Tabelle 11 zeigt die Zuordnung der besten Teilgebietsparametersets pro Ereignis und Station.

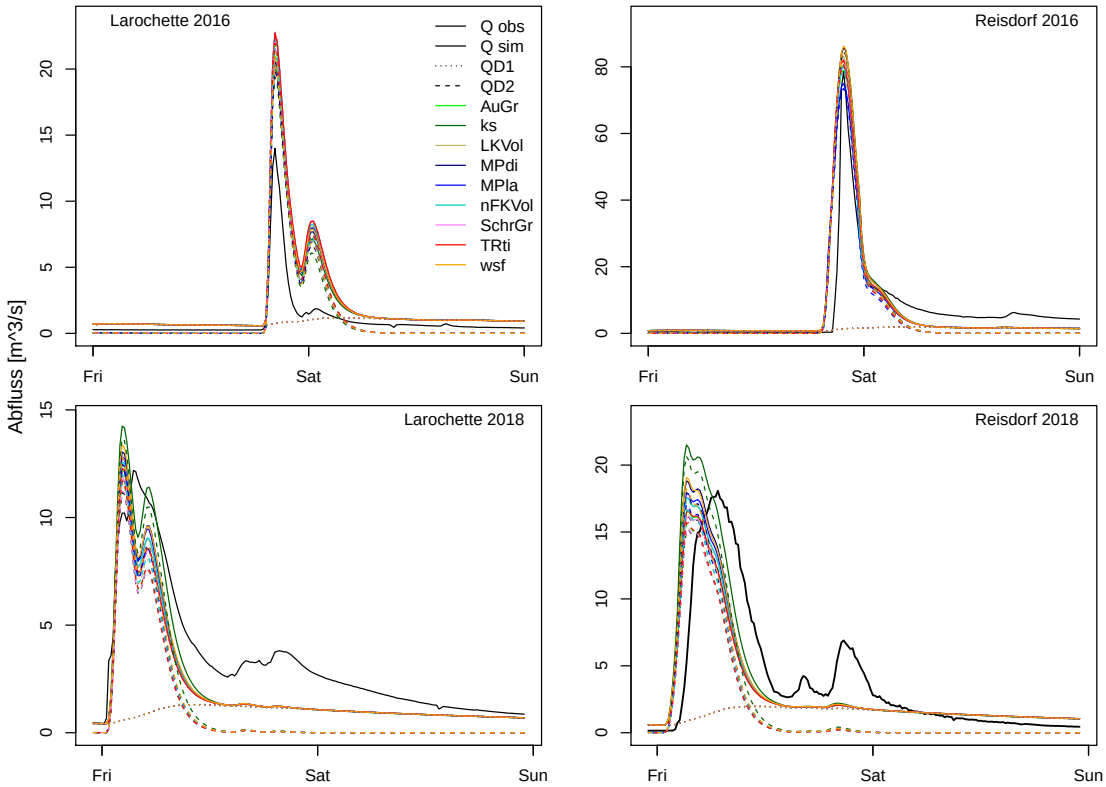

Abbildung 28: Darstellung des beobachteten Abfluss, Ausgangssimulation von Unterteilgebietsparameterset 3 und den nach R^2 effizientesten Parameterwerten

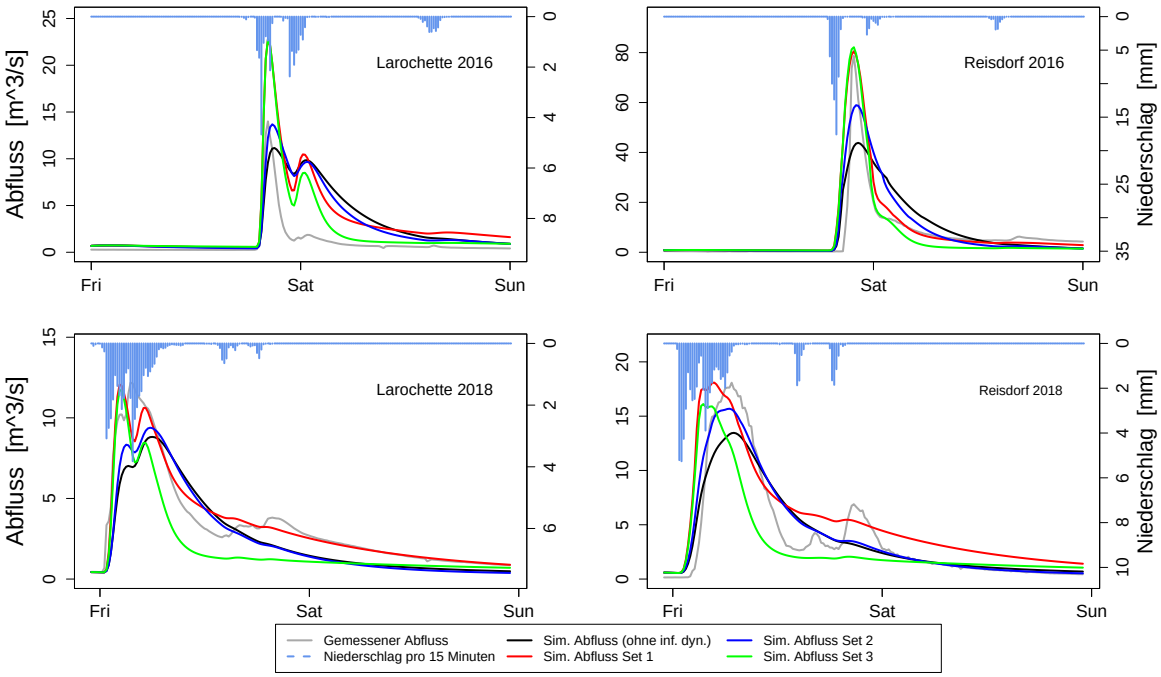

Abbildung 29: Vergleich der simulierten Abflussganglinien der drei Teilgebietsparametersets, dem beobachteten Abfluss und der Simulation ohne das dynamische Infiltrationsmodul.

6.3 Untersuchung der Niederschlags- und Vorfeuchteunsicherheit

Niederschlagsunsicherheit

Im Verlauf der Untersuchungen wurde ebenfalls der Einfluss von unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten untersucht. Dabei wurden die Niederschläge mit Faktoren von 0,8 bis 1,2 multipliziert und anhand der 77 erwähnten Teilgebietsparametersets für die Ereignisse 2016 und 2018 simuliert. Abbildung 30 zeigt das Verhältnis zwischen dem aufsummierten simulierten und beobachteten Abfluss der 77 verschiedenen Teilgebietsparametersets. Sofern das beobachtete Volumen das simulierte übersteigt, sind die Werte in blau bis weiß dargestellt und andersrum in rot bis gelb. Es ist zu erkennen, dass je nach Teilgebietsparameterset, der Übergang von höherem simulierten Abfluss zu höherem beobachteten Abfluss variiert. Das letzte der dargestellten Parametersets unterschätzt beispielsweise bei der Simulation in Larochette, über die gesamte Breite an Niederschlagsinput, das simulierte Abflussvolumen. Die Pfeile markieren die im vorherigen Unterkapitel beschriebenen Kategorien an Teilgebietsparametersets.

Tabelle 12 zeigt die sinnvollsten Niederschlagsfaktoren je nach Ereignis, dem aus Tabelle 11 entsprechendem Parameterset und den Daten der Abbildung 30 und Tabelle 13. Tabelle 13 zeigt eine Übersicht über die drei Kategorien an UTGB-Parametersets und der Variation der Niederschlagsdaten. Dabei ist zu erkennen, dass mit steigendem Niederschlag der Abflussanteil der schnellen Komponente steigt, während der der langsamen Komponente sinkt. Des Weiteren ist das Verhältnis zwischen den simulierten und beobachteten Abflussvolumen zu sehen, welche ebenfalls in Abbildung 30 dargestellt sind. Bei Larochette 2016 ist zu erkennen, dass unabhängig von dem verwendeten Parameterset das simulierte Abflussvolumen um das 1,7 - 4-fache überschätzt wird. Bei Reisdorf 2016 befinden sich die besten Niederschlagsfaktoren, je nach Set, zwischen 0,86 und 0,96. Für Larochette 2018 hat das Set der ersten Kategorie das Abflussvolumen mit den nicht manipulierten Niederschlagsdaten am besten getroffen. Für die beiden anderen Sets ist dazu ein Faktor von wenigsten 1,16 nötig. Das Ereignis von 2018 in Reisdorf zeigte für die drei Parameterset ganz unterschiedliche Ergebnisse. Die effizientesten Niederschlagsfaktoren waren in dem Fall 0,82, 0,98 und 1,12.

Tabelle 12: Darstellung der sinnvollsten Niederschlagsfaktoren, nach Ereignis und Zuordnung aus Tabelle 11, in Bezug auf das Abflussvolumen.

	Larochette 2016	Reisdorf 2016	Larochette 2018	Reisdorf2018
Parameterset	Set 3	Set 1	Set 1	Set 2
Niederschlagsfaktor	0.80	0.86	1.00	1.16

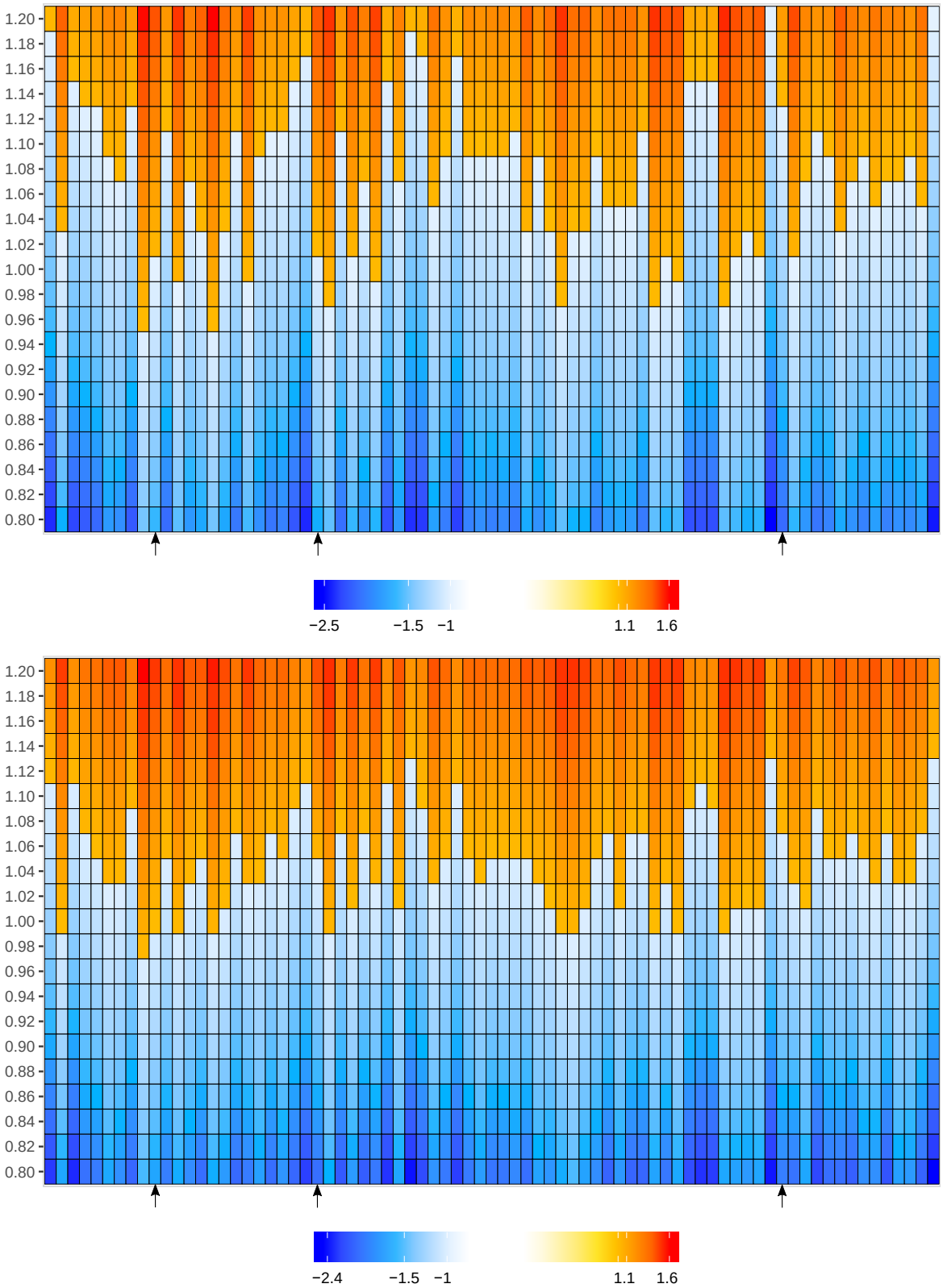

Abbildung 30: Abweichung der simulierten zu den beobachteten Abflussvolumen an der Station Larochette (oben) und Reisdorf (unten), 2018. Auf der Y-Achse sind die Multiplkationsfaktoren der Niederschlagsdaten dargestellt. Blau bis Weiß: Beobachtetes Abflussvolumen übersteigt das simulierte Abflussvolumen um den absoluten Faktor. Gelb bis Rot: Simuliertes Abflussvolumen übersteigt das beobachtete Abflussvolumen um den absoluten Faktor. Die Pfeile markieren die Teilgebietsparametersets in der Reihenfolge: Set 1, Set 3 und Set 2

Tabelle 13: Übersicht über die Anteilverteilung der Abflusskomponenten und des Verhältnis zwischen Simulation und Beobachtung im Verlauf der Niederschlagsunsicherheitsanalyse für die Teilgebietsparametersets der Kategorien 1-3. Die Spaltennamen stellen den verwendeten Multiplikationsfaktor dar. L = Larochette, R = Reisdorf, D2 = Schnelle Direktabflusskomponente, D1 = langsame Direktabflusskomponente. Bei negativen Verhältniswerten ist der beobachtete Abfluss mächtiger ($-\frac{obs}{sim}$), bei positiven Werten der simulierte Abfluss ($\frac{sim}{obs}$).

Ereignis 2016		0.80	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20
Kat. 1	LD2	0.39	0.40	0.41	0.42	0.42	0.43	0.44	0.45	0.46	0.46	0.47	0.48	0.49	0.49	0.50	0.50	0.51	0.52	0.52	0.53	0.53
	RD2	0.60	0.61	0.61	0.62	0.63	0.63	0.65	0.65	0.66	0.66	0.67	0.68	0.68	0.68	0.69	0.70	0.70	0.71	0.72	0.72	0.72
	LD1	0.61	0.60	0.59	0.58	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.54	0.53	0.52	0.51	0.51	0.50	0.50	0.49	0.48	0.48	0.47	0.47
	RD1	0.40	0.39	0.39	0.38	0.37	0.37	0.35	0.35	0.34	0.34	0.33	0.32	0.32	0.32	0.31	0.30	0.30	0.29	0.28	0.28	0.28
Verhältnis der	L	2.28	2.35	2.42	2.50	2.57	2.65	2.73	2.81	2.90	2.98	3.07	3.15	3.24	3.33	3.42	3.51	3.60	3.69	3.79	3.88	3.98
Abflussvolumen	R	-1.10	-1.06	-1.03	1.01	1.05	1.07	1.14	1.17	1.20	1.23	1.28	1.32	1.35	1.38	1.42	1.49	1.53	1.58	1.63	1.65	1.69
Kat. 2	LD2	0.46	0.47	0.47	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52	0.52	0.53	0.54	0.55	0.55	0.56	0.57	0.57	0.58	0.59	0.59	0.60	0.60
	RD2	0.68	0.68	0.69	0.70	0.70	0.71	0.72	0.72	0.73	0.73	0.74	0.75	0.75	0.75	0.76	0.76	0.77	0.77	0.78	0.78	0.78
	LD1	0.54	0.53	0.53	0.52	0.51	0.50	0.49	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.45	0.44	0.43	0.43	0.42	0.41	0.41	0.40	0.40
	RD1	0.32	0.32	0.31	0.30	0.30	0.29	0.28	0.28	0.27	0.27	0.26	0.25	0.25	0.25	0.24	0.24	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22
Verhältnis der	L	1.95	2.02	2.08	2.15	2.22	2.29	2.37	2.44	2.52	2.60	2.67	2.75	2.83	2.91	3.00	3.08	3.17	3.25	3.34	3.43	3.51
Abflussvolumen	R	-1.20	-1.15	-1.12	-1.07	-1.03	1.01	1.05	1.09	1.13	1.16	1.20	1.25	1.27	1.31	1.35	1.38	1.43	1.48	1.53	1.56	1.62
Kat. 3	LD2	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63	0.63	0.64	0.65	0.66	0.66	0.67	0.68	0.68	0.69	0.70
	RD2	0.75	0.76	0.76	0.77	0.78	0.78	0.80	0.80	0.81	0.81	0.81	0.82	0.82	0.82	0.83	0.83	0.84	0.84	0.85	0.85	0.85
	LD1	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39	0.38	0.37	0.37	0.36	0.35	0.34	0.34	0.33	0.32	0.32	0.31	0.30
	RD1	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22	0.22	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15
Verhältnis der	L	1.69	1.74	1.80	1.86	1.92	1.98	2.04	2.10	2.17	2.24	2.31	2.38	2.45	2.52	2.59	2.67	2.74	2.82	2.89	2.97	3.05
Abflussvolumen	R	-1.40	-1.34	-1.29	-1.24	-1.20	-1.17	-1.08	-1.06	-1.00	1.03	1.05	1.08	1.11	1.13	1.19	1.23	1.28	1.30	1.36	1.38	1.44
Ereignis 2018		0.80	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20
Kat. 1	LD2	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.27	0.28	0.29	0.30	0.30	0.31	0.32	0.33	0.33	0.34	0.35	0.35	0.36	0.37	0.37	0.38
	RD2	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.36	0.37	0.38	0.39	0.39
	LD1	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.73	0.72	0.71	0.70	0.70	0.69	0.68	0.67	0.67	0.66	0.65	0.65	0.64	0.63	0.63	0.62
	RD1	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.70	0.69	0.68	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.64	0.63	0.62	0.61	0.61
Verhältnis der	L	-1.39	-1.34	-1.29	-1.25	-1.21	-1.17	-1.13	-1.09	-1.05	-1.02	1.01	1.04	1.08	1.11	1.14	1.18	1.21	1.25	1.29	1.32	1.36
Abflussvolumen	R	-1.05	-1.01	1.03	1.07	1.11	1.15	1.20	1.24	1.29	1.33	1.38	1.43	1.48	1.52	1.58	1.63	1.68	1.73	1.78	1.84	1.90
Kat. 2	LD2	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45	0.45	0.46	0.47	0.47	0.48
	RD2	0.30	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45	0.46	0.47	0.47	0.48	0.49	0.50
	LD1	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.60	0.59	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.55	0.54	0.53	0.53	0.52
	RD1	0.70	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.60	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53	0.53	0.52	0.51	0.50
Verhältnis der	L	-1.86	-1.79	-1.72	-1.66	-1.59	-1.54	-1.48	-1.43	-1.38	-1.33	-1.29	-1.25	-1.20	-1.17	-1.13	-1.09	-1.06	-1.02	1.01	1.04	1.07
Abflussvolumen	R	-1.43	-1.37	-1.31	-1.26	-1.21	-1.16	-1.11	-1.07	-1.03	1.01	1.05	1.09	1.13	1.17	1.21	1.26	1.30	1.35	1.39	1.44	1.49
Kat. 3	LD2	0.40	0.42	0.43	0.44	0.46	0.47	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61
	RD2	0.41	0.43	0.44	0.45	0.47	0.48	0.49	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.61	0.62	0.63
	LD1	0.60	0.58	0.57	0.56	0.54	0.53	0.52	0.51	0.50	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39
	RD1	0.59	0.57	0.56	0.55	0.53	0.52	0.51	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39	0.39	0.38	0.37
Verhältnis der	L	-2.43	-2.33	-2.24	-2.15	-2.07	-1.99	-1.92	-1.85	-1.78	-1.72	-1.65	-1.60	-1.54	-1.49	-1.44	-1.39	-1.34	-1.30	-1.25	-1.21	-1.17
Abflussvolumen	R	-1.93	-1.83	-1.75	-1.68	-1.61	-1.54	-1.47	-1.41	-1.35	-1.29	-1.24	-1.19	-1.15	-1.10	-1.06	-1.02	1.02	1.06	1.09	1.13	1.18

Vorfeuchteunsicherheit

Tabelle 15 zeigt eine Übersicht über die drei Kategorien an UTGB-Parametersets und der Variation der Vorfeuchtebedingungen. Dabei ist bei den Kategorien 1 und 2 zu erkennen, dass mit steigender Vorfeuchte der Abflussanteil der schnellen Komponente absinkt, während die der langsamen Komponente im gleichen Verhältnis steigt. Nur bei der Kategorie 3 ist dies nicht der Fall. Wie in der Abbildung 31 dargestellt, steigt mit beim Ereignis in Larochette der Anteil der schnellen Direktabflusskomponenten beim Sprung des Multiplikationsfaktor von 0,5 auf 0,6 an, sinkt anschließend jedoch wieder ab. Beim Pegel in Reisdorf steigt der Anteil der schnellen Komponente bis zum Faktor 0,7 und sinkt anschließend wieder ab. Wie in Tabelle 15 zu erkennen ist, gilt das gleiche für das Teilgebietsparameterset der dritten Kategorie bei dem Ereignis von 2016. In diesem Fall befindet sich der Umschwung beim Sprung vom Multiplikationsfaktor 0,9 auf 1.

Für die Ereignisse aus dem Jahr 2016 ist zu erkennen, dass die simulierten Abflussvolumen mit steigender Vorfeuchte weiter überschätzt werden. Für Larochette sogar beim ersten Parameterset um bis das 4-fache bei 1,5 fachem Bodenwassergehalt. Die beiden anderen Sets zeigen nur in den Bereichen reduzierter Vorfeuchte für die Station in Reisdorf Unterschätzungen des Abflussvolumens. Bei den Ereignissen aus dem Jahr 2018 simuliert die Ausgangsbodenfeuchte das Abflussvolumen in Larochette anhand des ersten Parametersets am besten. Das dritte Parameterset unterschätzt unabhängig von der Vorfeuchte das simulierte Abflussvolumen in jedem Fall für das Jahr 2018. Gleiches gilt für das zweite Parameterset in Larochette. Das zweite Parameterset zeigt hingegen für den Vorfeuchtefaktor 0,9 das beste Ergebnis in Reisdorf.

Tabelle 14 fasst die Ergebnisse je nach Ereignis, dem aus Tabelle 11 entsprechendem Parameterset und den Daten der Abbildung 31 und Tabelle 15 zusammen.

Tabelle 14: Darstellung der sinnvollsten Vorfeuchtefaktoren, nach Ereignis und Zuordnung aus Tabelle 11, in Bezug auf das Abflussvolumen.

	Larochette 2016	Reisdorf 2016	Larochette 2018	Reisdorf2018
Parameterset	Set 3	Set 1	Set 1	Set 2
Niederschlagsfaktor	0.5	0.5	1.0	0.9

Tabelle 15: Übersicht zu den Anteilverteilung der Abflusskomponenten im Verlauf der Vorfeuchteunsicherheitsanalyse für die Teilgebietsparametersets der Kategorien 1-3. Die Spaltennamen stellen den verwendeten Multiplikationsfaktor dar. L = Larochette, R = Reisdorf, D2 = Schnelle Direktabflusskomponente, D1 = langsame Direktabflusskomponente. Bei negativen Verhältniswerten ist der beobachtete Abfluss mächtiger ($-\frac{obs}{sim}$), bei positiven Werten der simulierte Abfluss ($\frac{sim}{obs}$).

Ereignis 2016		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Kat. 1	LD2	0.511	0.505	0.497	0.488	0.480	0.471	0.460	0.449	0.436	0.422	0.407
	RD2	0.715	0.708	0.698	0.693	0.677	0.670	0.661	0.649	0.640	0.624	0.613
	LD1	0.489	0.495	0.503	0.512	0.520	0.529	0.540	0.551	0.564	0.578	0.593
	RD1	0.285	0.292	0.302	0.307	0.323	0.330	0.339	0.351	0.360	0.376	0.387
Verhältnis der	L	2.33	2.48	2.63	2.77	2.92	3.07	3.22	3.37	3.53	3.70	3.89
Abflussvolumen	R	1.04	1.10	1.14	1.20	1.22	1.28	1.33	1.37	1.43	1.46	1.53
Kat. 2	LD2	0.568	0.566	0.560	0.554	0.548	0.540	0.530	0.520	0.507	0.492	0.475
	RD2	0.770	0.765	0.761	0.754	0.747	0.740	0.733	0.725	0.711	0.699	0.684
	LD1	0.432	0.434	0.440	0.446	0.452	0.460	0.470	0.480	0.493	0.508	0.525
	RD1	0.230	0.235	0.239	0.246	0.253	0.260	0.267	0.275	0.289	0.301	0.316
Verhältnis der	L	2.10	2.22	2.33	2.45	2.56	2.67	2.79	2.91	3.03	3.17	3.32
Abflussvolumen	R	-1.01	1.04	1.08	1.12	1.16	1.20	1.24	1.29	1.31	1.35	1.39
Kat. 3	LD2	0.614	0.620	0.623	0.625	0.626	0.626	0.624	0.620	0.615	0.607	0.596
	RD2	0.818	0.817	0.820	0.819	0.818	0.813	0.811	0.806	0.801	0.795	0.785
	LD1	0.386	0.380	0.377	0.375	0.374	0.374	0.376	0.380	0.385	0.393	0.404
	RD1	0.182	0.183	0.180	0.181	0.182	0.187	0.189	0.194	0.199	0.205	0.215
Verhältnis der	L	1.94	2.02	2.10	2.17	2.24	2.31	2.37	2.44	2.51	2.58	2.65
Abflussvolumen	R	-1.10	-1.07	-1.02	1.01	1.04	1.05	1.08	1.09	1.11	1.14	1.15
Ereignis 2018		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Kat. 1	LD2	0.350	0.344	0.336	0.328	0.319	0.312	0.304	0.296	0.288	0.280	0.273
	RD2	0.345	0.341	0.336	0.330	0.322	0.316	0.310	0.302	0.295	0.289	0.282
	LD1	0.650	0.656	0.664	0.672	0.681	0.688	0.696	0.704	0.712	0.720	0.727
	RD1	0.655	0.659	0.664	0.670	0.678	0.684	0.690	0.698	0.705	0.711	0.718
Verhältnis der	L	-1.33	-1.25	-1.17	-1.10	-1.04	1.01	1.07	1.12	1.18	1.24	1.30
Abflussvolumen	R	1.02	1.09	1.16	1.24	1.31	1.38	1.46	1.53	1.61	1.69	1.77
Kat. 2	LD2	0.435	0.432	0.426	0.420	0.413	0.406	0.398	0.390	0.382	0.374	0.366
	RD2	0.437	0.435	0.431	0.426	0.420	0.414	0.408	0.400	0.393	0.385	0.378
	LD1	0.565	0.568	0.574	0.580	0.587	0.594	0.602	0.610	0.618	0.626	0.634
	RD1	0.56	0.56	0.57	0.57	0.58	0.59	0.59	0.60	0.61	0.61	0.62
Verhältnis der	L	-1.66	-1.57	-1.49	-1.42	-1.35	-1.29	-1.23	-1.18	-1.13	-1.08	-1.03
Abflussvolumen	R	-1.25	-1.17	-1.11	-1.05	-1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.26	1.31
Kat. 3	LD2	0.530	0.531	0.530	0.528	0.524	0.521	0.517	0.511	0.506	0.500	0.493
	RD2	0.544	0.547	0.547	0.546	0.544	0.541	0.538	0.533	0.528	0.521	0.515
	LD1	0.470	0.469	0.470	0.472	0.476	0.479	0.483	0.489	0.494	0.500	0.507
	RD1	0.456	0.453	0.453	0.454	0.456	0.459	0.462	0.467	0.472	0.479	0.485
Verhältnis der	L	-2.02	-1.93	-1.85	-1.78	-1.72	-1.65	-1.60	-1.54	-1.49	-1.44	-1.39
Abflussvolumen	R	-1.55	-1.47	-1.41	-1.35	-1.29	-1.24	-1.19	-1.15	-1.11	-1.07	-1.04

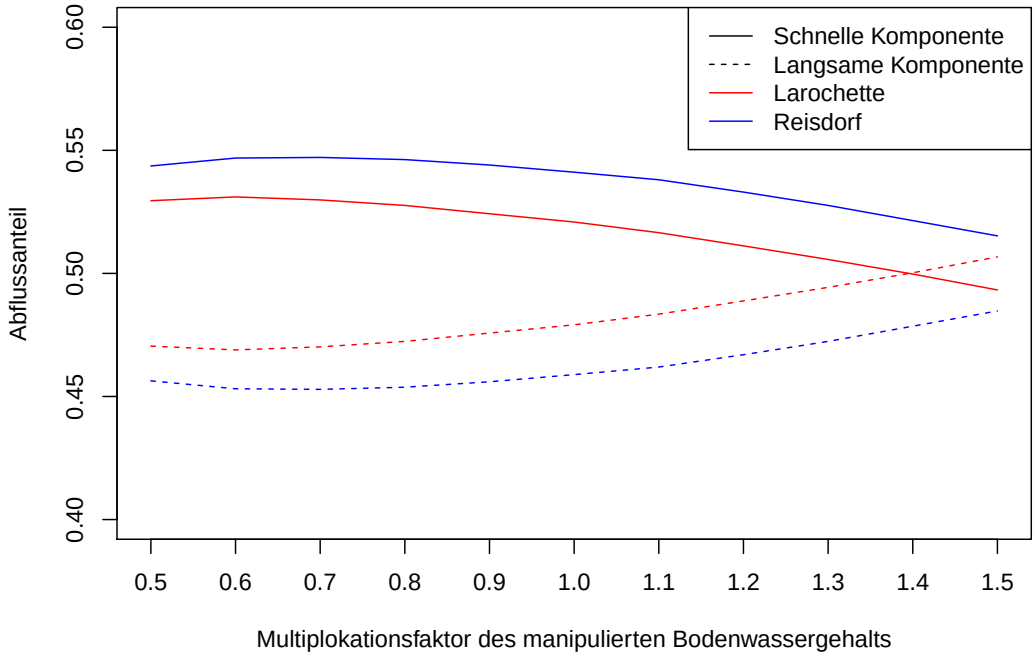

Abbildung 31: Variation der Komponentenanteile des simulierten Abflusses für das Ereignis 2018 bei Verwendung des Parametersets der dritten Kategorie.

In der Abbildung 32 ist das Verhältnis zwischen simuliertem und gemessenem Abfluss, bei variierten Vorfeuchtebedingungen, zu sehen. Es ist zu erkennen, dass eine Vielzahl an Teilgebietsparametersets unabhängig von den untersuchten Vorfeuchtebedingungen stets das simulierte Abflussvolumen unterschätzt. Die drei Kategorien zeigen für die zwei dargestellten Stationen unterschiedliche Reaktionen auf die variierten Vorfeuchtebedingungen. Die erste Kategorie zeigt für Larochette 2018 beim Sprung des Multiplikationsfaktors von 1,0 auf 1,1 den Umschwung von höherem gemessenem Gesamtabfluss zu höherem simulierten Abflussvolumen. In Reisdorf ist dies beim Wechsel von 0,9 zu 1,0 der Fall. Die zweite Kategorie simuliert unabhängig von den Vorfeuchtebedingungen für Larochette 2018 geringere Abflussvolumen als beobachtete. In Reisdorf gilt dies bis zu den Faktoren 1,3 und 1,4. Die dritte Kategorie verhält sich bei Larochette 2018 ähnlich wie die erste Kategorie und stellt den Wechsel des dominierendem Anteils beim Faktorwechsel von 1,1 auf 1,2 dar. In Reisdorf 2018 hingegen ist dieser Umschwung beim Wechsel von 1,3 zu 1,4 zu beobachten.

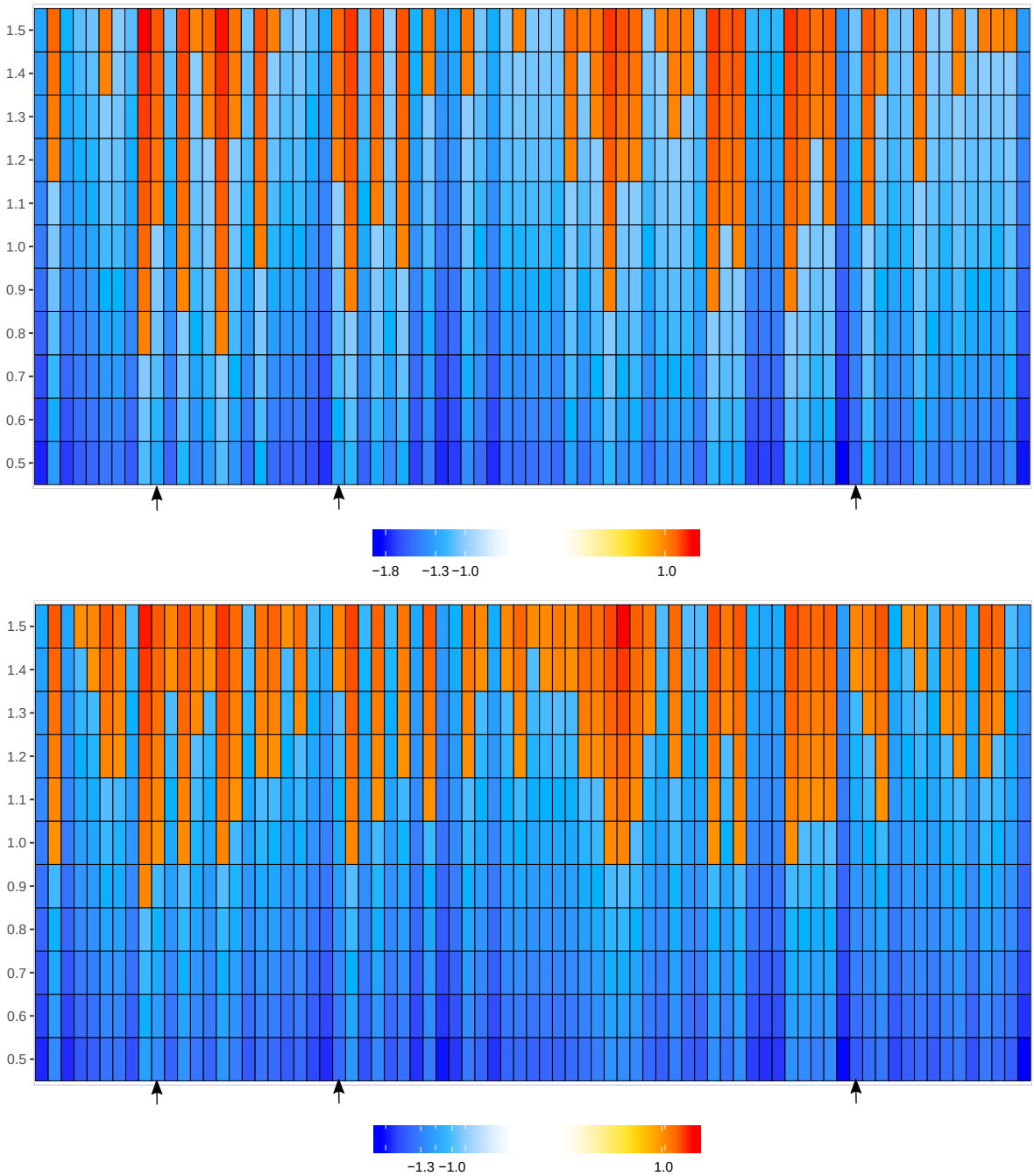

Abbildung 32: Abweichung der simulierten zu den beobachteten Abflussvolumen an der Station Larochette (oben) und Reisdorf (unten), 2018. Auf der Y-Achse sind die Multiplkationsfaktoren des Bodenwassergehalts dargestellt. Blau bis Weiß: Beobachtetes Abflussvolumen übersteigt das simulierte Abflussvolumen um den absoluten Faktor. Gelb bis Rot: Simuliertes Abflussvolumen übersteigt das beobachtete Abflussvolumen um den absoluten Faktor. Die Pfeile markieren die Teilgebietsparametersets in der Reihenfolge: Set 1, Set 3 und Set 2

7 Diskussion

Die im vorherigen Kapitel aufgelisteten und beschriebenen Ergebnisse werden in diesem Teil diskutiert und evaluiert, mit den Hypothesen verglichen und an die Literatur herangebracht.

Ergebnisse der Modellierung

Mit Hilfe der im Verlauf der Studie aufgestellten Teilgebietsparametersets ist es größtenteils gelungen, bessere Ergebnisse über die Simulation beider Ereignisse mit dem dynamischen Infiltrationsmodul anhand LARSIM zu erreichen, als ohne das Modul. Bei der Sensitivitätsanalyse der Teilgebietsparameter wurden die Richtlinien des Kalibrierleitfadens (Haag et al., 2016) nur teilweise befolgt. In diesem Schritt diente die Sensitivitätsanalyse nicht nur dazu die sensitiven Parameterbereiche zu bestimmen, sondern auch als Kalibrierungswerkzeug des Modells. Laut Haag et al. (2016) wird die Kalibrierung von LARSIM anhand längeren Zeitreihen, ohne das dynamische Infiltrationsmodul und mit Hilfe aller im Einzugsgebiet vorhandenen Pegelstationen durchgeführt. In dieser Studie wurde hingegen neben dem Einsatz des dynamischen Infiltrationsmodul auch ohne längere Datenzeitreihen kalibriert. Die sich als sensitiv erwiesenen Teilgebietsparameter BSF und EQD (Abb. A.2 und A.3) wiesen nach den letzten Monte Carlo Simulationen eine stärkere Variabilität je nach Pegelstation, Ereignis und Bewertungsmaß auf, als der sensitive Parameter EQD2.

Die Teilgebietsparametersätze, welche nach der letzten Monte Carlo Simulation als am besten evaluiert wurden, zeigen beim Ereignis aus dem Jahr 2018 eine sehr große Variabilität. Diese Variabilität ist hauptsächlich anhand des unterschiedlichen Verhaltens der langsamen und schnellen Direktabflusskomponenten zu erkennen. Im Vergleich zu den besten 77 Parametersets hat sich die Variabilität deutlich verringert. Die bei der Unsicherheitsanalyse der UTGB-Parameter ausgewählten Kategorien von Teilgebietsparametersets zeigen für das Set der ersten Kategorie bei der Simulation von Larochette 2016 und Reisdorf 2018, im Vergleich zu der beobachteten Ganglinie, einen zu hohen simulierten Abfluss. Grund dafür ist die hohe Abflussspende der langsamen Direktabflusskomponenten. Bei der zweiten Kategorie werden die simulierten Abflüsse aufgrund des Verhaltens der langsamen Abflusskomponenten bei Larochette 2016 überschätzt und bei Reisdorf 2016 und Larochette 2018 unterschätzt. Das dritte Set verfügt über die geringsten Werte der langsamen Direktabflusskomponente, wodurch der gesamte simulierte Abfluss bei allen Simulationen, bis auf Larochette 2016, unterschätzt wurde. Das zweite Parameterset verfügt dabei über den geringsten EQD- und höchsten EQD2-Wert. EQD2 hat, als Eichgröße der Rückhaltekonstante des schnellen Direktabflussspeichers, innerhalb des Modells, neben dem dynamischen Infiltrationsmoduls, einen großen Einfluss auf die Geschwindigkeit mit welcher die Abflussspitze erreicht wird und wie mächtig diese Abflussspitze ist. Das zweite Teilgebietsparameterset hat einen deutlich höheren EQD2-Wert, was auch in Abbildung 27 zu erkennen ist. Im Vergleich zu den beiden anderen Parametersets wird der Abflussscheitel beim

Ereignis von 2018 in Larochette erst nach dem gemessenen Scheitel erreicht und die eigentliche Abflussspitze quantitativ unterschritten. Bei der Station in Reisdorf hingegen ist der Zeitpunkt der simulierten Abflussspitze näher an der gemessenen. Das Abflussvolumen wird dabei dennoch leicht unterschätzt. Die beiden anderen Parametersets simulieren die Abflussspitze in Larochette zum selben Ereignis früher als sie gemessen wurde, wobei der Anstieg des Abflussvolumens besser getroffen wird. In Reisdorf wird bei beiden Sets hingegen die Abflussspitze in beiden Fällen zu früh durch die Simulation erreicht. Dies zeigt, dass besonders im Bezug zu den Abflussspitzen der Parameter EQD2 richtig kalibriert sein muss um den sich oberflächlich bildenden HOF in Form des schnellen Direktabflusses ideal zu simulieren. Des Weiteren wurde festgestellt, dass von der ersten zur dritten Kategorie hin der Anteil des schnellen Direktabflusses steigt und der der langsamen Komponenten sinkt. Dies kann an den BSF Werten der Parametersets liegen. Dieser sorgt als Exponent der Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion zur Anpassung des Direktabflussanteils in Abhängigkeit der Bodenspeicherfüllung dafür, dass bei einem geringen Parameterwert erst bei hoher Sättigung des Bodenspeichers eine Zunahme des Direktabflusses kommt. Bei höheren Werten ist der Direktabflussanteil auch bei geringeren Bodenwassergehalten deutlich höher (LEG, 2019). Der Bodenspeicher ist dem dynamischen Infiltrationsmodul nachgeschaltet, dementsprechend beziehen sich die Einflüsse von BSF nur auf die langsame Direktabflusskomponente. Dies zeigt, dass die richtige Kalibrierung des Parameters BSF grundlegend dafür ist, dass die Abflussrezession gut simuliert werden kann.

Bei der Unsicherheitsanalyse der UTGB-Parameter wurde deutlich, dass die Unsicherheiten bezüglich der verwendeten bodenphysikalischen und landnutzungsspezifischen Kennwerte sich ebenfalls deutlich auf das Modellergebnis auswirken können und dass bessere Werte eines Bewertungsmaßes nicht mit einer höheren Modelleffizienz gleichgesetzt werden können. Den größten Einfluss auf Modelleffizienz hat von diesen Parametern die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit gezeigt. Die Reduzierung der hydraulischen Leitfähigkeit um 25 % für das Ereignis von 2018 in Reisdorf ergab bei der Simulation mit dem dritten Teilgebietsparameterset eine Erhöhung von R^2 um rund 60 %. Die Auswertungen anhand D und VE ergaben ebenfalls bessere Ergebnisse bei einer Reduzierung der hydraulischen Leitfähigkeit um 17,5 %. In diesem Fall haben sich die Ergebnisse je nach Bewertungsmaß lediglich nur um 1,8 % verbessert. Jedoch ist in diesem Fall die Abflussspitze um ungefähr 25 % überschritten worden und der zeitliche Versatz der simulierten Abflussspitze konnte zudem nicht verbessert werden. Niedrigere k_s-Werte ermöglichen es dem Modell weniger Ereigniswasser infiltrieren zu lassen, wodurch ein größerer Anteil an sich schnell bildendem oberflächlichem Abfluss entsteht. Die hydraulische Leitfähigkeit gehört neben der Niederschlagsintensität, der effektiven Porosität, den Vorfeuchtebedingungen, der Saugspannung an der Sättigungsfront und dem Versieglungsgrad zu den Haupteingangsparametern der Matrixinfiltration, welche den ersten Schritt bei der Unterteilung zwischen schneller und langsamer Komponente durchführt. Physikalische Bodeneigenschaften können jedoch auch innerhalb einer kleinen Fläche sehr variabel sein, was sich besonders auf sensitive Modellparameter auswirkt (Davis et al., 1999) und in diesem Fall die hydraulische

Leitfähigkeit. Eine weitere Unsicherheitsquelle ist in den landnutzungs- und bodenspezifischen Daten zu finden. Nach Steinbrich et al. (2016) besteht besonders bei den Eigenschaften der Makroporen (Makroporenlänge und -dichte) eine große Unsicherheit. In den Ergebnissen ist festzustellen, dass die Makroporendichte auch in diesem Fall größere Unsicherheiten mit sich trägt, als andere UTGB-Parameter. Böden, welche über ähnliche Eigenschaften verfügen, zeigen dennoch unterschiedliche Charakteristiken bezüglich den erwähnten Eigenschaften. Die Ergebnisse der Untersuchung zu den Unsicherheiten der UTGB-Parameter zeigen, dass die Variation dieser bodenspezifischen Parameter einen großen Einfluss auf die Verteilung des Ereigniswassers hin zu schnellen oder langsamen Direktabflusskomponenten hat. Sinkt durch die Variation eines UTGB-Parameters der Wert der schnellen Direktabflusskomponenten, so steigt die Abflussspende der langsamen Direktabflusskomponenten an, was plausibel erscheint, da diese Parameter das Verhalten des dynamischen Infiltrationsmoduls steuern.

Bei der Variation des Eingangsniederschlags wurde mit steigender Niederschlagsintensität auch der Anteil der schnellen Direktabflusskomponente größer und der langsamen Komponente geringer. Dies ist in der Form zu erwarten gewesen, da das Infiltrationsmodul bei steigendem Niederschlagsvolumen einen geringeren Anteil des Ereigniswassers infiltrieren lassen kann, als bei geringeren Niederschlagsmengen. Bei der Variation des Bodenwassergehalts vor dem Niederschlagsereignis steigt bei der dritten Kategorie der Anteil der schnellen Komponente erst an und fällt anschließend ab, was bei den weiteren Kategorien nicht der Fall ist. Die Simulation des Ereignis aus dem Jahr 2018, anhand des Parameterset 1, zeigte bei der Station in Larochette ein ordentliches Ergebnis. Die gegebenen Niederschlags- und Vorfeuchtedaten führten zu dem besten Ergebnis bei dieser Simulation.

In der Auswertung war je nach Ereignis zu erkennen, dass die Abflussspitzen zum beobachteten Zeitpunkt simuliert werden konnten. In anderen Fällen war das nicht der Fall. Dies kann unabhängig von unpassender Parametrisierung auch von Unsicherheiten der beobachteten oder von den Beobachtungen abgeleiteten, treibenden Eingangsdaten zusammenhängen (Beven, 2012). RADOLAN („Radar Online Adjustment“) ist ein radarbasiertes, über Stationsdaten angepasstes qualitatives Niederschlagsprodukt. Dieses Niederschlagsprodukt wurde in den letzten Jahren stetig weiter verbessert, dennoch konnte eine Tendenz zur quantitativen Unterschätzung des Niederschlags in den Produkten der letzten Jahre festgestellt werden (Kreklow et al., 2020). Die verwendeten beobachteten Abflussdaten, welche bei der Modellkalibrierung von LARSIM verwendet wurden, können dabei auch eine große Unsicherheit zur Auswertung des Modellfeedbacks beigetragen haben. Da die Kalibrierung nur anhand der zu den Starkregenereignissen gehörenden Daten durchgeführt wurde, können diese auch zu nicht idealen Parameterwerten aller hydrologischen Ereignissen in diesem Einzugsgebiet geführt haben. Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, treten bei Hochwasser vermehrt Faktoren auf, welche die Genauigkeit von Messsystemen beeinflussen können.

Die angewendete Strategie bei der Kalibrierung führte dazu, dass drei Kategorien an Parameterverteilungen entstanden sind. Beim Ereignis von 2016 in Larochette hat das zweite Teilgebietsparameterset die Abflussspitze am besten getroffen. Jedoch wurde der weitere Verlauf der Ganglinie nicht getroffen, wodurch das Parameterset der dritten Kategorie in Bezug auf die drei Bewertungsmaße die beste Simulationsleistung aufgebracht hat, obwohl die Abflussspitze auf das doppelte Volumen des beobachteten Wertes geschätzt wurde. Es kann davon ausgegangen werden, dass Unsicherheiten aus den verschiedenen Unsicherheitsquellen, besonders Niederschlag- und Abflussmessung, bzw. den simulierten Vorfeuchtebedingungen, bei der Auswertung der Sensitivitätsanalyse dafür verantwortlich sind, dass unterschiedliche Ergebnisse für die idealen Parameterbereiche, in Form der drei Kategorien, zustande gekommen sind. Wie in Ehret und Bàrdossy (2002) angegeben, besteht bei Sturzfluten das Risiko, dass aufgrund von Treibgut oder Erosion/Sedimentation das Gerinneprofil an der Abflussmessstelle beeinträchtigt werden kann, was sich auf die Datenqualität auswirkt.

Nicht alle Teilgebietsparametersets konnten in Bezug auf die Bewertungsmaße bessere Ergebnisse vorweisen, als LARSIM ohne das dynamische Infiltrationsmodul. Dies ist besonders in der Tabelle B.3 zu sehen. In Bezug auf die volumetrische Effizienz VE erreichten die drei untersuchten Kategorien der Teilgebietsparametersets Werte die dem Ergebnis von LARSIM ohne das dynamische Infiltrationsmodul deutlich unterlegen sind. In diesem Fall konnten die drei Kategorien an Teilgebietsparametersets zu ähnlichen Schlüssen kommen, was das am besten passende Parameterset für die einzelnen Simulationen angeht. Krause et al. (2005) kritisierten bei ihren Untersuchungen, dass der Vereinbarungsindex D aufgrund der quadrierten Differenz zwischen den Beobachtungen und Simulationen, besonders sensitiv auf die Simulation von Abflussspitzen reagiert, jedoch dadurch nicht optimal zur Bewertung bei Niedrigwasser ist. R^2 kann laut Krause et al. (2005) ebenfalls nur schlecht zur Modellevaluierung genutzt werden, da dieser rein auf Korrelationen beruht und dadurch auch für schlechte Simulationen gute Ergebnisse ausgeben kann. Muleta (2012) fand bei seinen Untersuchungen zur Effizienzbewertung von hydrologischen Modellen, dass Bewertungsmaße, welche zur gleichen Kategorie wie VE besonders effizient für die Simulation von Hoch- und Niedrigwasser sind und dementsprechend bei Modellkalibrierungen, welche nur ein bestimmtes Ziel zur Modelloptimierung verfolgen, gut geeignet sind. Nichtsdestotrotz kommt die Untersuchung zu der Schlussfolgerung, dass sofern mehrere Ziele durch die Modellkalibrierung erreicht werden sollen, eine kombinierte Anwendung von Bewertungsmaßen, welche die besten Leistungen je nach Auswertungsziel erbringen, bei der Kalibrierung von Vorteil sind. Razavi und Gupta (2015) schreibt dazu, dass die verwendeten Bewertungsmaße in einer solchen Weise genutzt werden sollen, dass die wichtigen Verhaltensaspekte eines Modells richtig charakterisiert werden können.

In Bezug auf die bei der Problemstellung dargestellten Hypothesen, kann gesagt werden, dass beide erfüllt wurden. Einerseits konnte die erste Hypothese, dass die kombinierte Verwendung von LARSIM und dem dynamischen Infiltrationsmodul aus RoGeR die Abflusssimulation, bei

den untersuchten Starkregenereignissen, zum Teil deutlich verbessert hat. Des Weiteren hat sich auch bestätigt, dass die kombinierte Anwendung, auch wenn dadurch die Simulationsergebnisse verbessert wurden, die Unsicherheiten nicht umgangen wurden. Natürlich führte die Nutzung des dynamischen Infiltrationsmoduls dazu, dass die von LARSIM gegebene Unsicherheit bei der Simulation der Infiltrationsprozesse umgangen werden konnten. Spezifische Heterogenitäten innerhalb der Bodenmatrix beeinflussen noch immer die starren, auf Rasterzellen begrenzten, gebietsbeschreibenden Daten zu den Bodeneigenschaften.

Razavi und Gupta (2015) listeten verschiedene Punkte auf, welche Ziele Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen verfolgen und zeigen, wie für einen angemessenen Umgang mit den Ergebnissen gesorgt wird. In dieser Studie wurden folgende Zielsetzungen der Autoren erarbeitet.

Wichtigkeit und Funktion der Faktoren:
Die Wichtigkeit der Faktoren wurde anhand der Sensitivitätsanalyse der Teilgebietsparameter über die Monte Carlo Simulationen untersucht. Dies ermöglichte die Parameter auf ihre Sensibilität zu untersuchen. Die untersuchten Parameter BSF, EQD und EQD2 zeigten ereignisweise deutlich diese Wichtigkeit, was anhand der Scatterplots und den HSY-Plots verdeutlicht wurde. Das Ziel der Faktorenfunktion wurde nur begrenzt erreicht. Die Auswirkung von EQD2 und EQD auf die schnelle und die langsame Direktabflusskomponente ließen sich anhand der drei unterschiedlichen Kategorien an Teilgebietsparametersets erschließen.

Sensitive Bereiche:
Ähnlich wie beim vorherigen Punkt wurden auch in diesem Fall die sensitiven Parameterbereiche im Verlauf der Sensitivitätsanalyse der Teilgebietsparameter erörtert. Je nach Ereignis verschoben sich die sensitiven Bereiche der Parameter.

Unsicherheitsverteilung:
Bei der Unsicherheitsverteilung geht es darum eine quantitative Zuordnung der Unsicherheiten den unterschiedlichen Unsicherheitsfaktoren zuzuschreiben. Nach Saltelli et al. (2019) sollen Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse anhand globaler Methoden durchgeführt werden. Die Untersuchung der Unterteilgebietsparameter wurde jedoch lokal nach der OAT Methode durchgeführt. Über eine regionale/globale AAT Methode hätte beispielsweise eine Einschätzung der Unsicherheit verschiedener UTGB-Parameterparameterkombinationen untersucht werden können. Die bei der dynamischen Infiltration nacheinander ablaufenden Berechnungen hängen alle voneinander ab. Unsicherheiten aus der Matrixinfiltration werden mit in die Makroporen- und Trockenrissinfiltration übernommen. Eine über- bzw. unterschätzte Matrixinfiltration leitet zu viel, bzw. zu wenig Ereigniswasser aus einem Zeitschritt zu den Folgeprozessen. Dadurch wäre eine AAT Herangehensweise zur Untersuchung der Unsicherheiten sinnvoller gewesen. Durch heterogene Strukturen innerhalb der Bodenmatrix, können die UTGB-Parameter lokal von den verwendeten Daten abweichen, auch wenn das verwendete Unterteilgebiet-Teilgebiet System

dazu beiträgt solche Unsicherheiten zu minimieren.

In Bezug auf die Unsicherheit der Niederschlagsdaten und der Vorfeuchtedaten, müssen die Unsicherheiten differenziert betrachtet werden. Das in das Modell eingehende Niederschlagsprodukt ist eine Kombination verschiedener Messsysteme und der Dateninterpolation. Die Daten der Bodenfeuchte hingegen beruhen auf dem Ergebnis vorheriger Modellierungen und sind dementsprechend indirekt von Niederschlagsunsicherheit abhängig.

8 Schlussfolgerung

Im Verlauf der Untersuchung hat sich ergeben, dass LARSIM mit der Unterstützung des dynamischen Infiltrationsmoduls aus dem RoGeR Modell die Abflussganglinien besser darstellen konnte als ohne das Modul. Je nach Bewertungsmaß ergab sich in fast jedem Fall eine Optimierung der simulierten Abflussganglinie. Ebenfalls bei der optischen Bewertung des Ganglinienverhaltens wurden zu jedem Ereignis ein passenderer Abfluss simuliert. Die unterschiedlichen Kategorien an effizienten Parametersets konnten den in den meisten Fällen gut Ergebnisse liefern, welche die beobachteten Abflüsse meistens nicht ganz genau reproduzieren konnten, jedoch zur realistischen Einschätzung des Ereignisausmaßes, genau genug. In dieser Form, wenn die Qualität der treibenden Niederschlags- und Gebietsdaten über die benötigte Güte verfügen, simuliert das LARSIM Modell das hydrologische Geschehen besser, als ohne das dynamische Infiltrationsmodul aus RoGeR. Sofern diese Leistung auch im operationellen Modellbetrieb erreicht werden kann, stellt diese kombinierte Version aus LARSIM und RoGeR ein vernünftiges Werkzeug zur Risikoeinschätzung bei einem Starkniederschlagsereignis in den untersuchten Größenordnungen dar.

Die konkrete Güte der verwendeten Niederschlags-, der beobachteten Abfluss-, der gebietscharakteristischen Boden- und Landnutzungs-, sowie der simulierten Vorfeuchtedaten konnte anhand dieser Untersuchung nicht erörtert werden. Jedoch wurde dargestellt, dass Unsicherheiten dieser Daten einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Modellergebnisse haben. Nichtsdestotrotz haben auch die unterschiedlichen Parametersets unterschiedliche Reaktionen auf die verschiedenen Parametervariationen gezeigt.

Im Verlauf der Auswertung wurde des Weiteren deutlich, dass die Verwendung unterschiedlicher Bewertungsmaße auch zu unterschiedlich deutlichen Ergebnissen führt. Dementsprechend ist es notwendig bei der Modellkalibrierung und -evaluierung die am besten geeigneten Bewertungsmaße, für die angestrebten Ziele, zu verwenden.

Literaturverzeichnis

Bachmair, S. und Weiler, M. (2011), New dimensions of hillslope hydrology, *in* 'Forest Hydrology and Biogeochemistry', Springer Netherlands, pp. 455–481.

Becker, A. (1995), 'Problems and progress in macroscale hydrological modelling', *Fed-des, R. A. (ed.): Space and time scale variability and interdependencies in hydrological processes. Intern. Hydr. Series, Cambridge Univers* pp. 135–144.

Berg, P., Moseley, C. und Haerter, J. O. (2013), 'Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures', *Nature Geoscience* **6**(3), 181–185.

Bergström, S. (1976), 'Development and application of a conceptual runoff model for scandinavian catchments', *Bulletin Series A 52: University of Lund* .

Beven, K. (1989), *Interflow*, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 191–219.
URL: `https://doi.org/10.1007/978-94-009-2352-2_7`

Beven, K. (2012), *Rainfall-Runoff Modelling*, John Wiley & Sons, Ltd.

Beven, K. und Binley, A. (1992), 'The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction', *Hydrological Processes* **6**(3), 279–298.

Beven, K. J. und Clarke, R. T. (1986), 'On the variation of infiltration into a homogeneous soil matrix containing a population of macropores', *Water Resources Research* **22**(3), 383–388.

Bracken, L. J. und Croke, J. (2007), 'The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems', *Hydrological Processes* **21**(13), 1749–1763.

Criss, R. E. und Winston, W. E. (2008), 'Do nash values have value? discussion and alternate proposals', *Hydrological Processes* **22**(14), 2723–2725.

Davis, S. H., Vertessy, R. A. und Silberstein, R. P. (1999), 'The sensitivity of a catchment model to soil hydraulic properties obtained by using different measurement techniques', *Hydrological Processes* **13**(5), 677–688.

Devia, G. K., Ganasri, B. und Dwarakish, G. (2015), 'A review on hydrological models', *Aquatic Procedia* **4**, 1001–1007.

Dickinson, R. E. (1984), Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models, *in* 'Climate Processes and Climate Sensitivity', American Geophysical Union, pp. 58–72.

Doerr, S., Shakesby, R. und Walsh, R. (2000), 'Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance', *Earth-Science Reviews* **51**(1-4), 33–65.

Dunne, T. und Black, R. D. (1970), 'Partial area contributions to storm runoff in a small new england watershed', *Water Resources Research* **6**(5), 1296–1311.

Ehret, U. und Bàrdossy, A. (2002), 'Hochwasser-Staatsfeind Nr. 1', *Jahrbuch aus Lehre und Forschung der Universität Stuttgart* pp. 52–64.

El-Hames, A. S. und Richards, K. S. (1998), 'An integrated, physically based model for arid region flash flood prediction capable of simulating dynamic transmission loss', *Hydrological Processes* **12**(8), 1219–1232.

England, J. F., Velleux, M. L. und Julien, P. Y. (2007), 'Two-dimensional simulations of extreme floods on a large watershed', *Journal of Hydrology* **347**(1-2), 229–241.

Estupina-Borrell, V., Dartus, D. und Ababou, R. (2006), 'Flash flood modeling with the MARINE hydrological distributed model', *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* **3**(6), 3397–3438.

Foody, G. M., Ghoneim, E. M. und Arnell, N. W. (2004), 'Predicting locations sensitive to flash flooding in an arid environment', *Journal of Hydrology* **292**(1-4), 48–58.

Green, W. H. und Ampt, G. A. (1911), 'Studies on soil physics. 1. flow of air and water through soils', *J Agric Sci 4* .

Haag, I., Johst, M., Sieber, A. und Bremicker, M. (2016), 'Leitfaden zur Kalibrierung von LARSIM-Wasserhaushaltsmodellen für den operationellen Einsatz in der Hochwasservorhersage'.

Haag, I., Teltscher, K. und Krumm, J. (2020), Vorstudie zur Fortschreibung des operationellen LARSIMSystems zur Hochwasserfrühwarnung in kleineren Einzugsgebieten im WHM Sauer - Starkregen Weiße Ernz, Technical report, HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH.

Hapuarachchi, H. A. P., Wang, Q. J. und Pagano, T. C. (2011), 'A review of advances in flash flood forecasting', *Hydrological Processes* **25**(18), 2771–2784.

Horton, R. E. (1933), 'The rôle of infiltration in the hydrologic cycle', *Transactions, American Geophysical Union* **14**(1), 446.

Hrachowitz, M., Savenije, H., Blöschl, G., McDonnell, J., Sivapalan, M., Pomeroy, J., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M., Ehret, U., Fenicia, F., Freer, J., Gelfan, A., Gupta, H., Hughes, D., Hut, R., Montanari, A., Pande, S., Tetzlaff, D., Troch, P., Uhlenbrook, S., Wagener, T., Winsemius, H., Woods, R., Zehe, E. und Cudennec, C. (2013), 'A decade of predictions in ungauged basins (PUB)—a review', *Hydrological Sciences Journal* **58**(6), 1198–1255.

Knapp, H. V., Durgunoglu, A. und Ortel, T. W. (1991), 'A review of rainfall-runoff modeling for stormwater management', *Illinois State Water Survey, Hydrology Division, SWS Contract Report* (516), 1–92.

Kobold, M. und Brilly, M. (2006), 'The use of HBV model for flash flood forecasting', *Natural Hazards and Earth System Sciences* **6**(3), 407–417.

Krause, P., Boyle, D. P. und Bäse, F. (2005), 'Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment', *Advances in Geosciences* **5**, 89–97.

Kreklow, J., Tetzlaff, B., Burkhard, B. und Kuhnt, G. (2020), 'Radar-based precipitation climatology in germany—developments, uncertainties and potentials', *Atmosphere* **11**(2), 217.

Kron, W., Löw, P. und Kundzewicz, Z. W. (2019), 'Changes in risk of extreme weather events in europe', *Environmental Science & Policy* **100**, 74–83.

LEG, L. E. (2019), 'Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele'.

LUBW (2017), 'Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg', Landesanstalt für Umwelt Messungen und Naturschutz, Karlsruhe.

Luxemburger Wort (2019), 'Vor der nächsten Flut'. Letzter Zugriff: 07.03.2021.
URL: `https://www.list.lu/fr/espace-media/presse/vor-der-naechsten-flut/`

Muleta, M. K. (2012), 'Model performance sensitivity to objective function during automated calibrations', *Journal of Hydrologic Engineering* **17**(6), 756–767.

Munich RE (2016), 'Naturkatastrophen 2015: Analysen, Bewertungen, Positionen'. Letzter Zugriff: 28.02.2021.
URL: `https://www.munichre.com/content/dam/munichre/contentlounge/website-pieces/documents/302-08874_de.pdf/_jcr_content/renditions/original./302-08874_de.pdf`

Peschke, G. (1985), 'Zur Bildung und Berechnung von Regenabfluss', *Zeitschrift der TU Dresden* **34(4)**(34), 195–200.

Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J. W., Rougier, J., Stephenson, D. B. und Wagener, T. (2016), 'Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow', *Environmental Modelling & Software* **79**, 214–232.

Razavi, S. und Gupta, H. V. (2015), 'What do we mean by sensitivity analysis? the need for comprehensive characterization of "global" sensitivity in earth and environmental systems models', *Water Resources Research* **51**(5), 3070–3092.

Saltelli, A., Aleksankina, K., Becker, W., Fennell, P., Ferretti, F., Holst, N., Li, S. und Wu, Q. (2019), 'Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices', *Environmental Modelling & Software* **114**, 29–39.

Saltelli, A., Chan, K. und Scott, E. M., eds (2000), *Sensitivity Analysis*, WILEY, New York.

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. und Tarantola, S., eds (2007), *Global Sensitivity Analysis. The Primer*, John Wiley & Sons, Ltd.

Scherrer, S. (1997), Abflussbildung bei Starkniederschlägen Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge, PhD thesis, ETH Zürich.

Scherrer, S. und Naef, F. (2003), 'A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland', *Hydrological Processes* **17**(2), 391–401.

Scherrer, S., Naef, F., Faeh, A. O. und Cordery, I. (2007), 'Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation', *Hydrology and Earth System Sciences* **11**(2), 907–922.

Schumann, A. (2004), 'Nach dem Hochwasser ist vor dem Hochwasser', *Rubin-Wissenschaftsmagazin der Ruhr Universität Bochum* pp. 36 – 44.

Sidle, R. C., Noguchi, S., Tsuboyama, Y. und Laursen, K. (2001), 'A conceptual model of preferential flow systems in forested hillslopes: evidence of self-organization', *Hydrological Processes* **15**(10), 1675–1692.

Sirdaş, S. und Şen, Z. (2007), 'Determination of flash floods in western arabian peninsula', *Journal of Hydrologic Engineering* **12**(6), 676–681.

Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K. und Avant, B. (2018), 'An overview of rainfall-runoff model types', *International Congress on Environmental Modelling and Software* **41**.

Spear, R. und Hornberger, G. M. (1980), 'Eutrophication in peel inlet—II. identification of critical uncertainties via generalized sensitivity analysis', *Water Research* **14**(1), 43–49.

Steinbrich, A., Leistert, H. und Weiler, M. (2016), 'Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution', *Environmental Earth Sciences* **75**(21).

Steinbrich, A., Weiler, M. und Leistert, H. (2015), 'Alles RoGeR? Modellierung von Sturzfluten aufgrund von Starkniederschlägen'.

Takeuchi, K., Hapuarachchi, P., Zhou, M., Ishidaira, H. und Magome, J. (2008), 'A BTOP model to extend TOPMODEL for distributed hydrological simulation of large basins', *Hydrological Processes* **22**(17), 3236–3251.

Weiler, M. und McDonnell, J. (2004), 'Virtual experiments: a new approach for improving process conceptualization in hillslope hydrology', *Journal of Hydrology* **285**(1-4), 3–18.

Weiler, M. und McDonnell, J. J. (2006), 'Testing nutrient flushing hypotheses at the hillslope scale: A virtual experiment approach', *Journal of Hydrology* **319**(1-4), 339–356.

Weiler, M. und Naef, F. (2003), 'An experimental tracer study of the role of macropores in infiltration in grassland soils', *Hydrological Processes* **17**(2), 477–493.

WHO, W. (2021), 'Floods'. Letzter Zugriff: 28.02.2021.
URL: `https://www.who.int/health-topics/floods#tab=tab_1`

WMO, W. (2017), 'Flash flood guidance system (ffgs) with global coverage'. Letzter Zugriff: 15.02.2021.
URL: `http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/flood/ffgs/index_en.php`

Young, P. C., Hornberger, G. M. und Spear, R. C. (1978), 'Modeling badly defined systems: some further thoughts.', *Proceedings SIMSIG Conference* pp. 24–32.

Zhao, R. J. (1980), 'Flood forecasting method for humid regions of china', *East China Institute of Hydraulic Engineering* .

Zhou, X. und Lin, H. (2017), Local sensitivity analysis, *in* 'Encyclopedia of GIS', Springer International Publishing, pp. 1130–1131.

Anhang

A Abbildungen

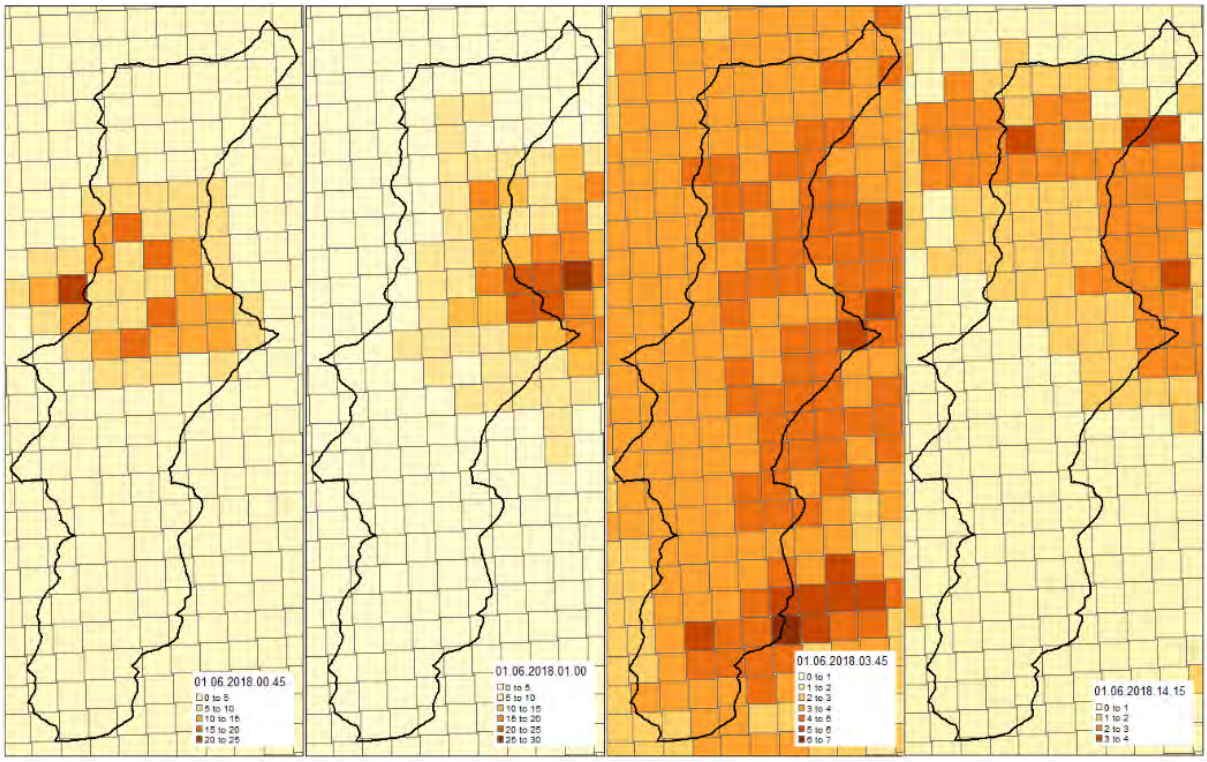

Abbildung A.1: Ausschnitte des korrigierten Radardatenproduktes für das Ereignis 2018, Niederschlagsintensität in mm

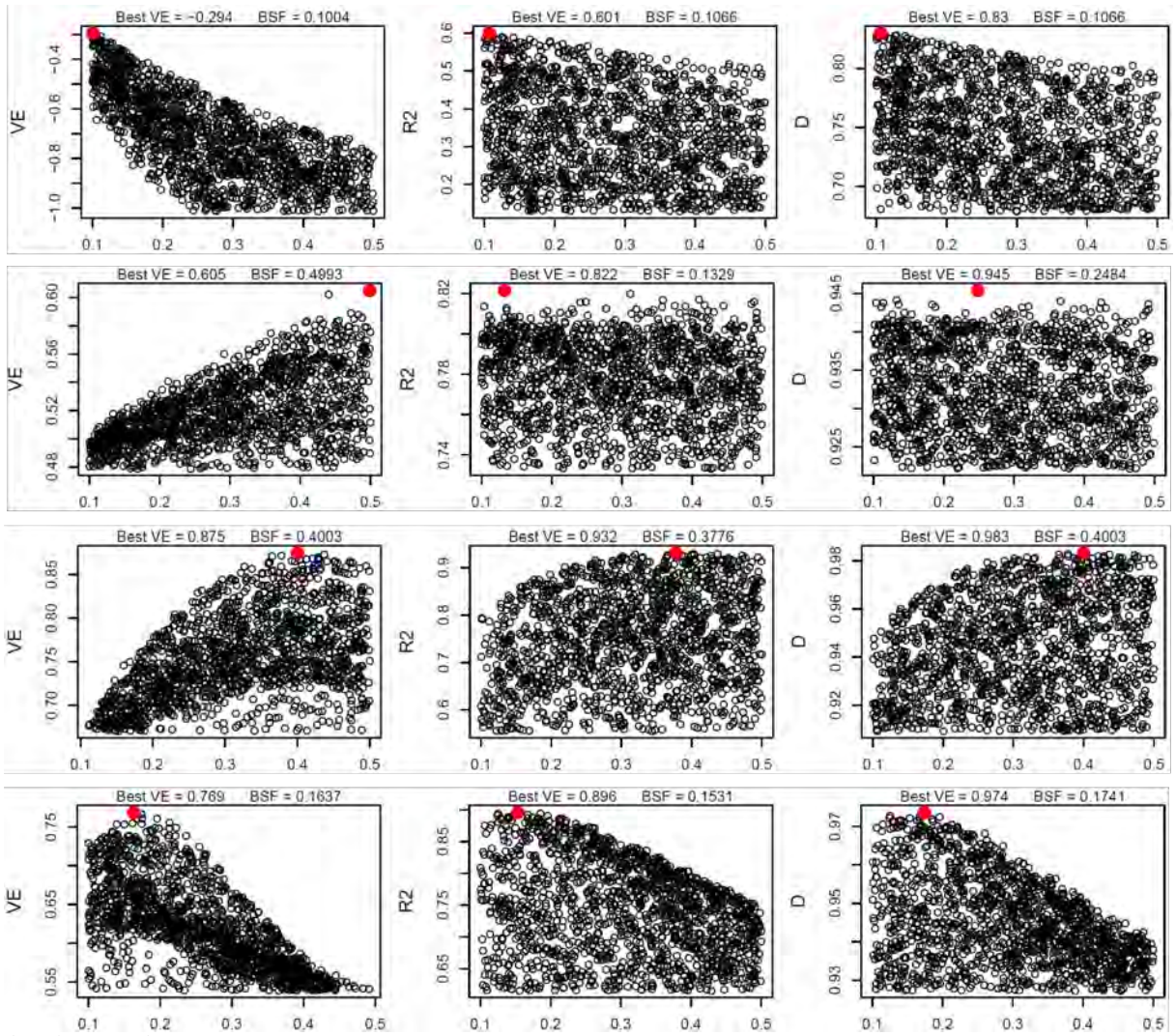

Abbildung A.2: Scatterplots mit dem sensitiven Parametern BSF nach den letzten Monte Carlo Simulationen. Spalte 1: Ausgewertet nach R^2, Spalte 1: Ausgewertet nach VE, Spalte 3: Ausgewertet nach D. Zeile 1: Simulation für Larochette 2016, Zeile 2: Simulation für Reisdorf 2016, Zeile 3: Simulation für Larochette 2018, Zeile 4: Simulation für Reisdorf 2018

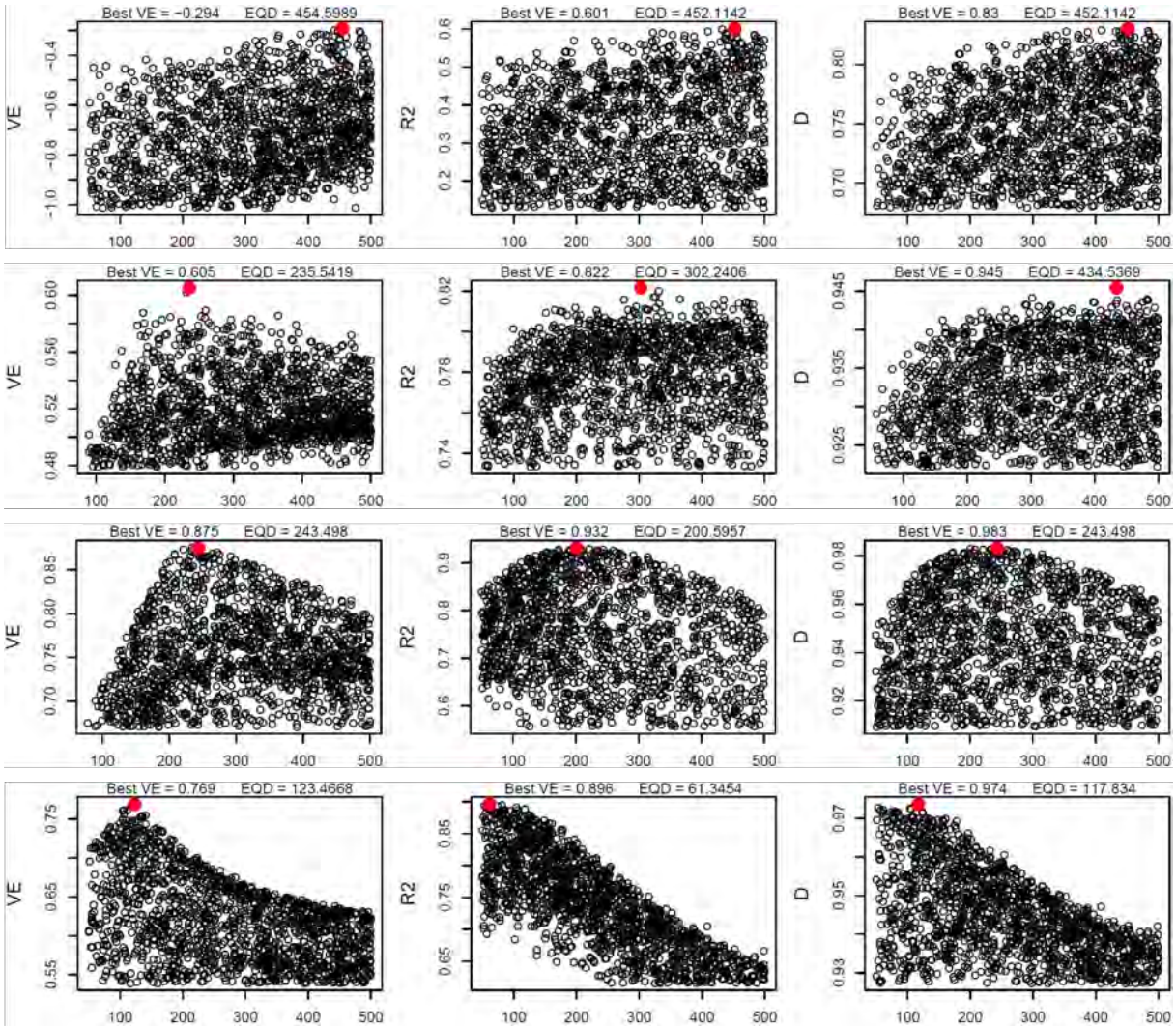

Abbildung A.3: Scatterplots mit dem sensitiven Parametern EQD nach den letzten Monte Carlo Simulationen. Spalte 1: Ausgewertet nach R^2, Spalte 1: Ausgewertet nach VE, Spalte 3: Ausgewertet nach D. Zeile 1: Simulation für Larochette 2016, Zeile 2: Simulation für Reisdorf 2016, Zeile 3: Simulation für Larochette 2018, Zeile 4: Simulation für Reisdorf 2018

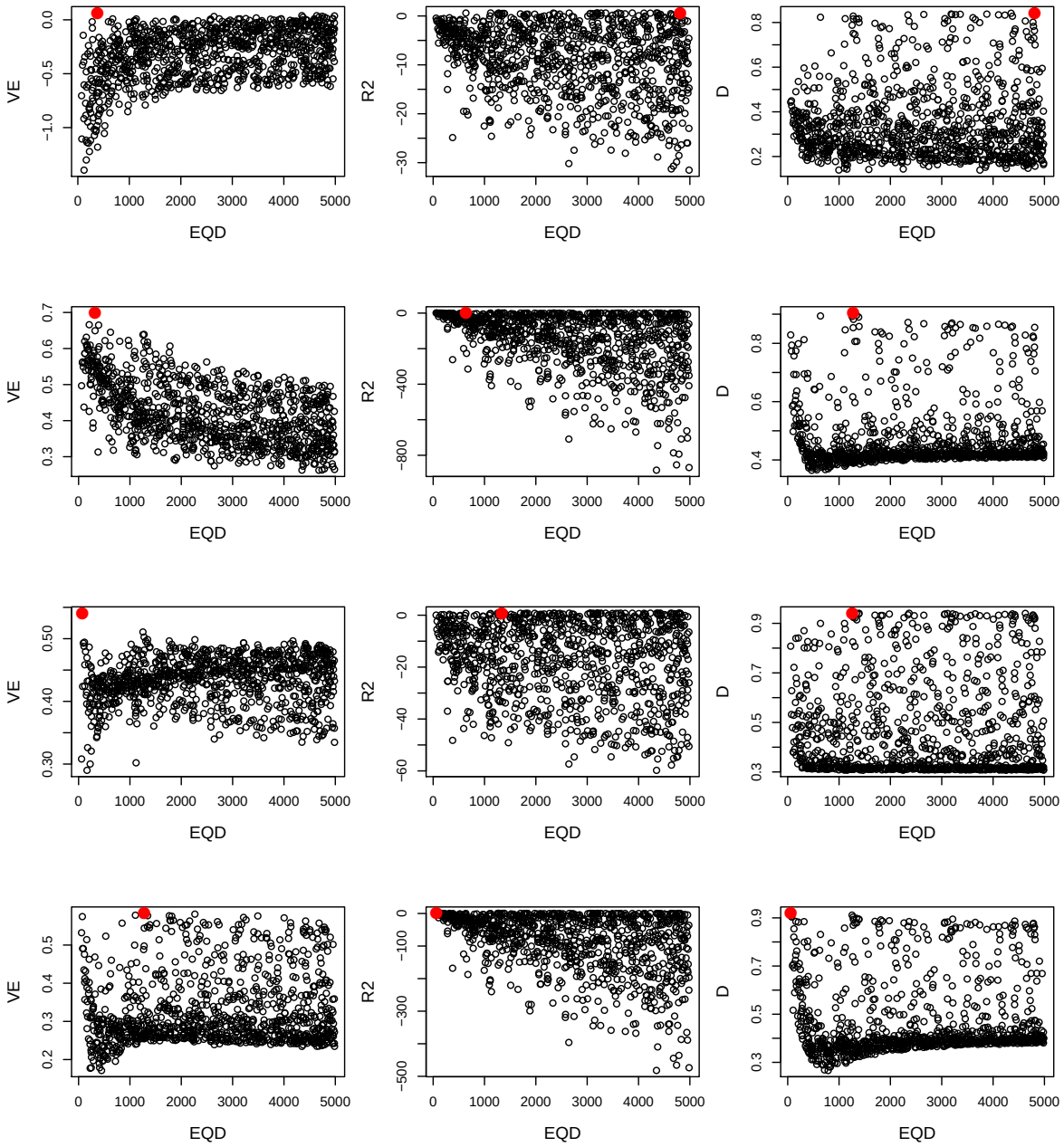

Abbildung A.4: Scatterplots mit dem sensitiven Parametern EQD nach den ersten Monte Carlo Simulationen. Spalte 1: Ausgewertet nach R^2, Spalte 1: Ausgewertet nach VE, Spalte 3: Ausgewertet nach D. Zeile 1: Simulation für Larochette 2016, Zeile 2: Simulation für Larochette 2018, Zeile 3: Simulation für Reisdorf 2016, Zeile 4: Simulation für Reisdorf 2018

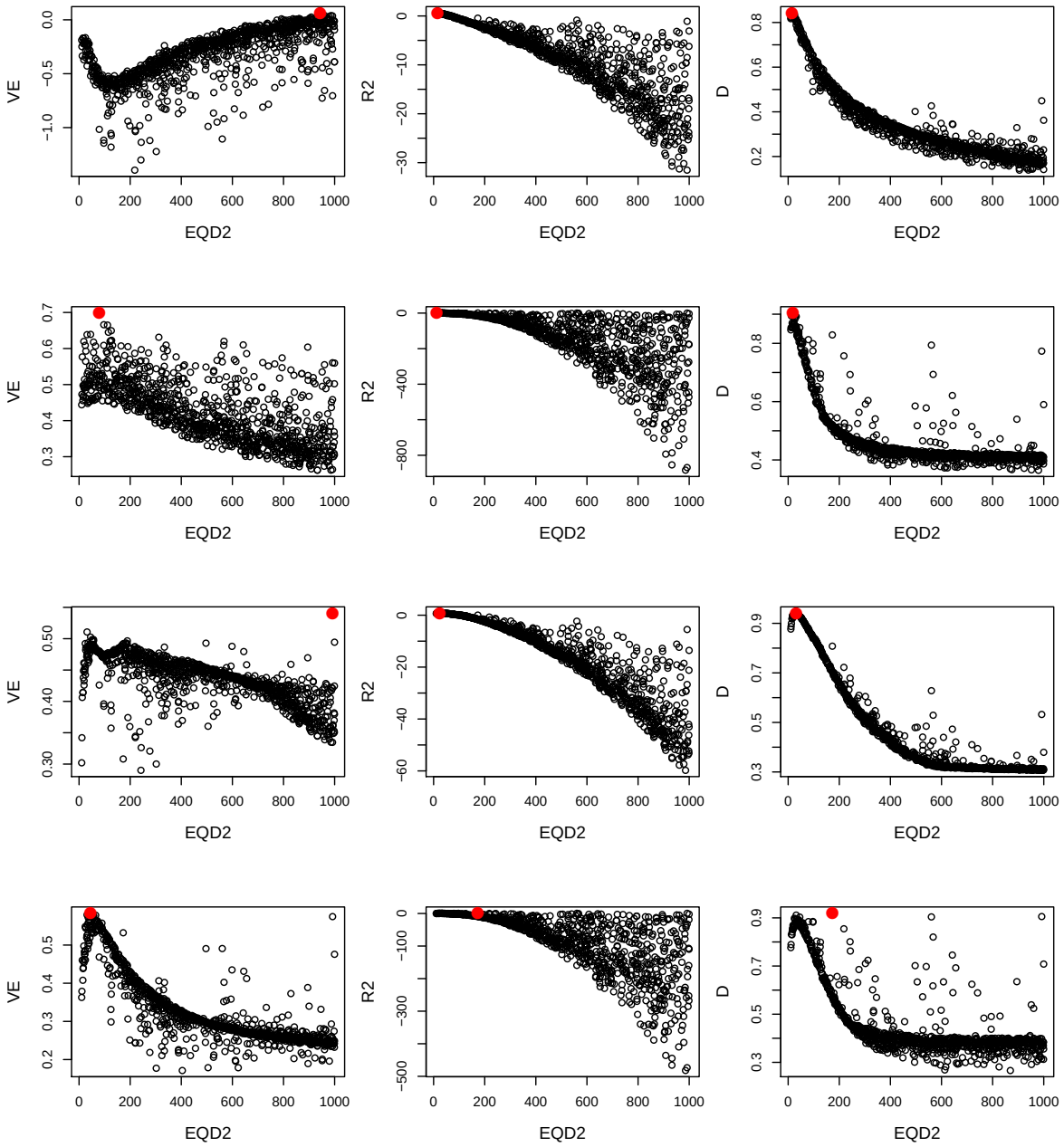

Abbildung A.5: Scatterplots mit dem sensitiven Parametern EQD2 nach den ersten Monte Carlo Simulationen. Spalte 1: Ausgewertet nach R^2, Spalte 1: Ausgewertet nach VE, Spalte 3: Ausgewertet nach D. Zeile 1: Simulation für Larochette 2016, Zeile 2: Simulation für Larochette 2018, Zeile 3: Simulation für Reisdorf 2016, Zeile 4: Simulation für Reisdorf 2018

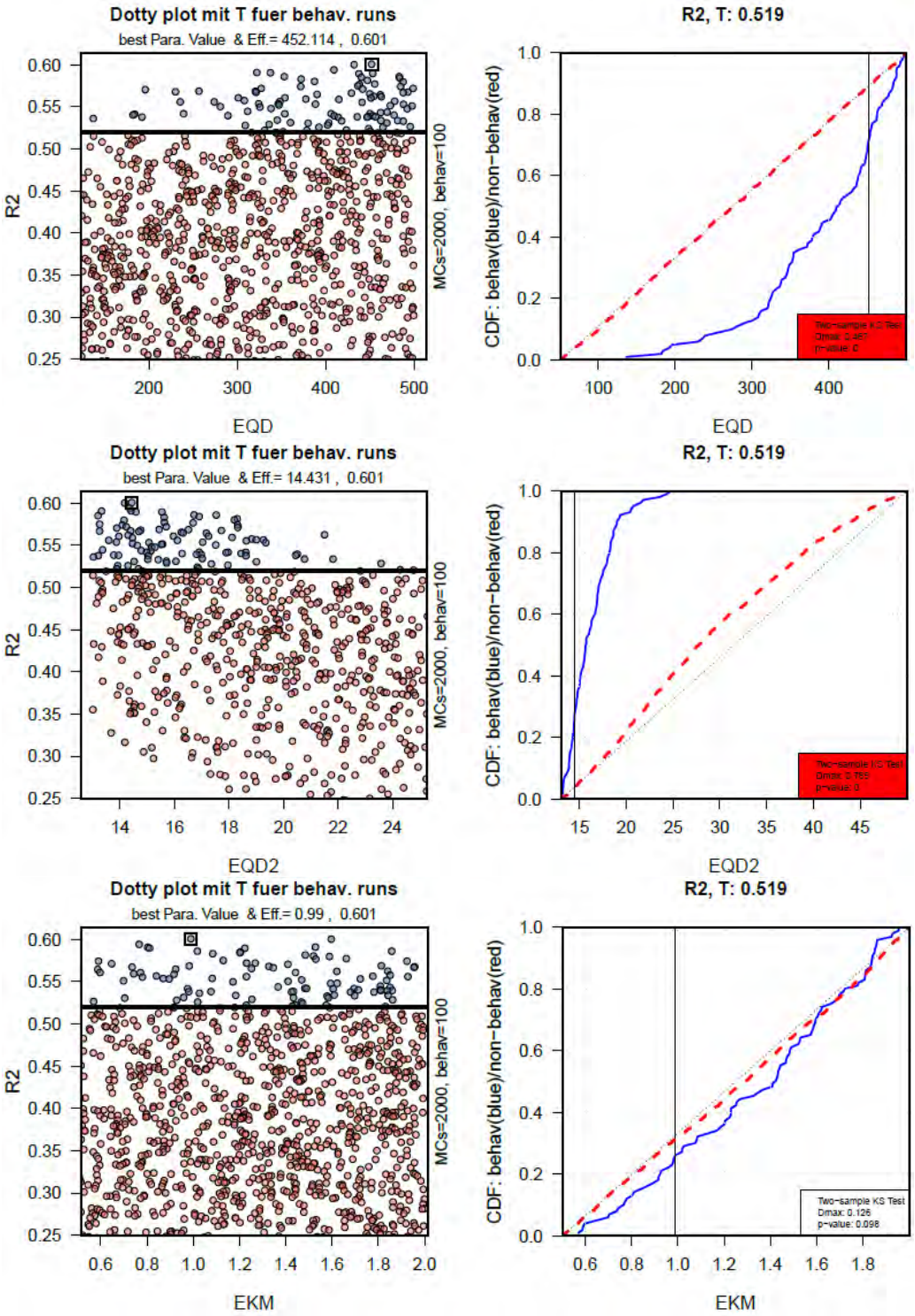

Abbildung A.6: HSY Ergebnisse von den Parametern EQD, EQD2 und EKM beim Ereignis 2016 in Larochette

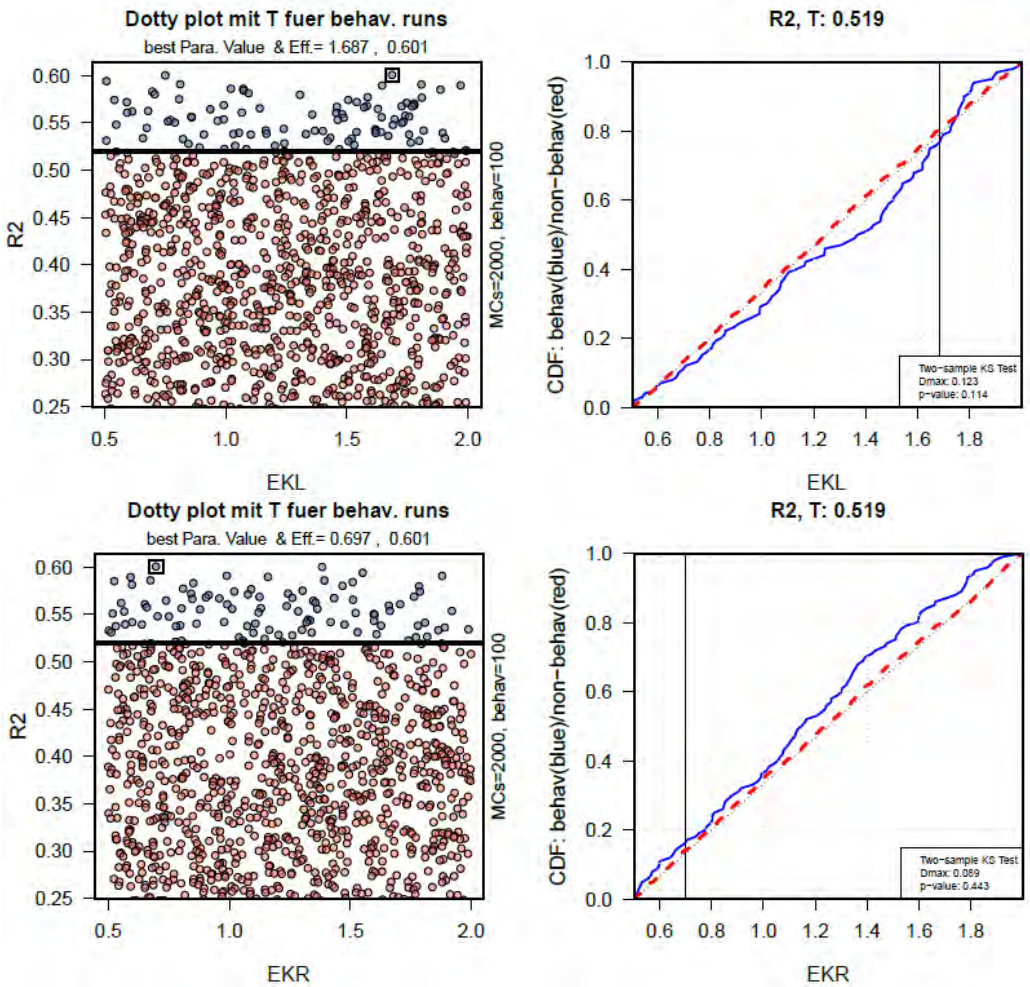

Abbildung A.7: HSY Ergebnisse von den Parametern EKL und EKR beim Ereignis 2016 in Larochette

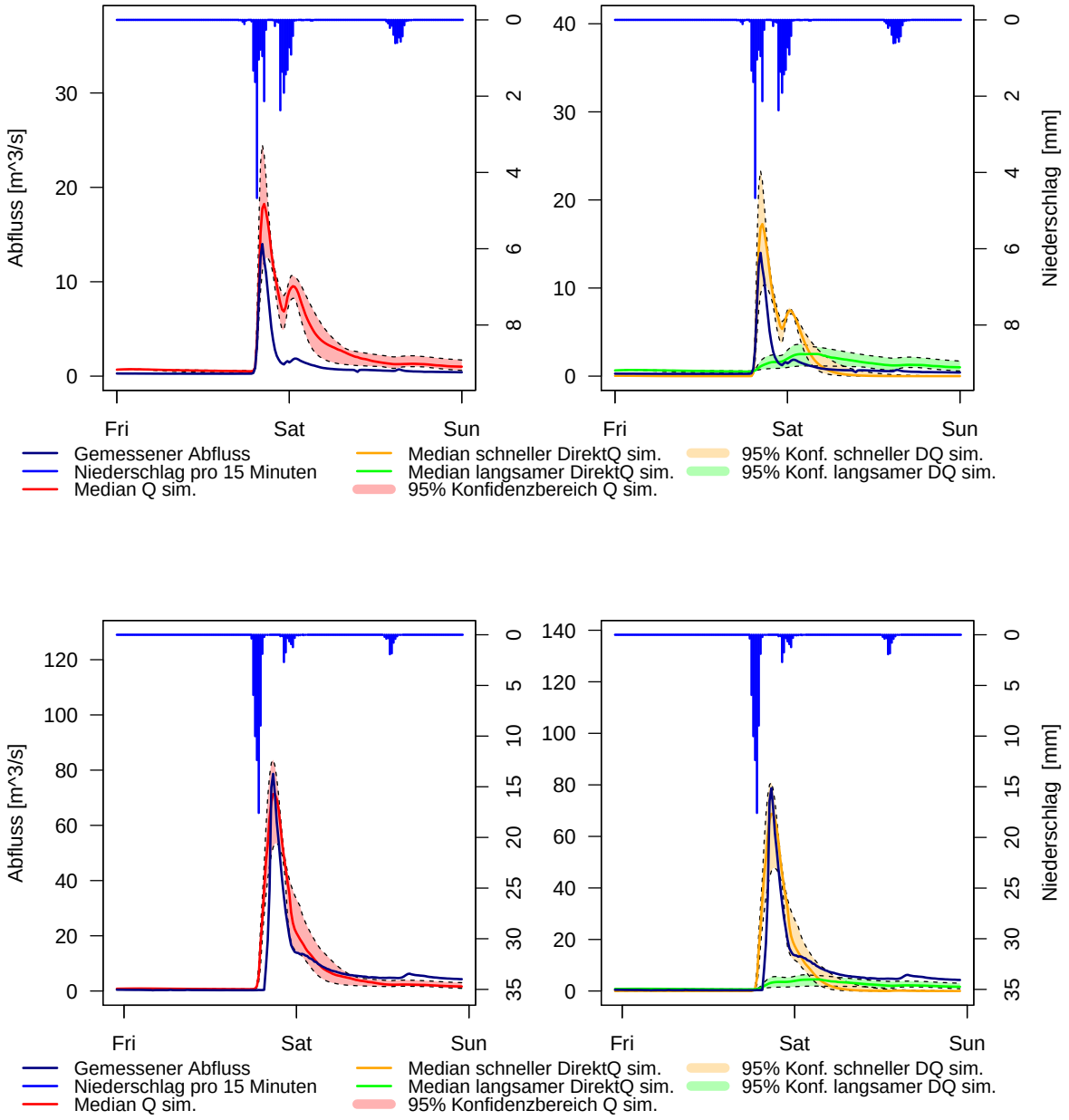

Abbildung A.8: Ergebnisse der besten 77 Parametersets der letzten Monte Carlo Simulationen,ausgewertet nach D, mit gemessenem Abfluss und dem vom Modell berechneten relativen Niederschlag für die Pegelstationen: Oben: Larochette, 2016; Unten: Reisdorf, 2016 . Links: Median und 95% Konfidenzbereich aller Simulationen. Rechts: Median und 95% Konfidenzinterval der langsamen und der schnellen Abflusskomponente

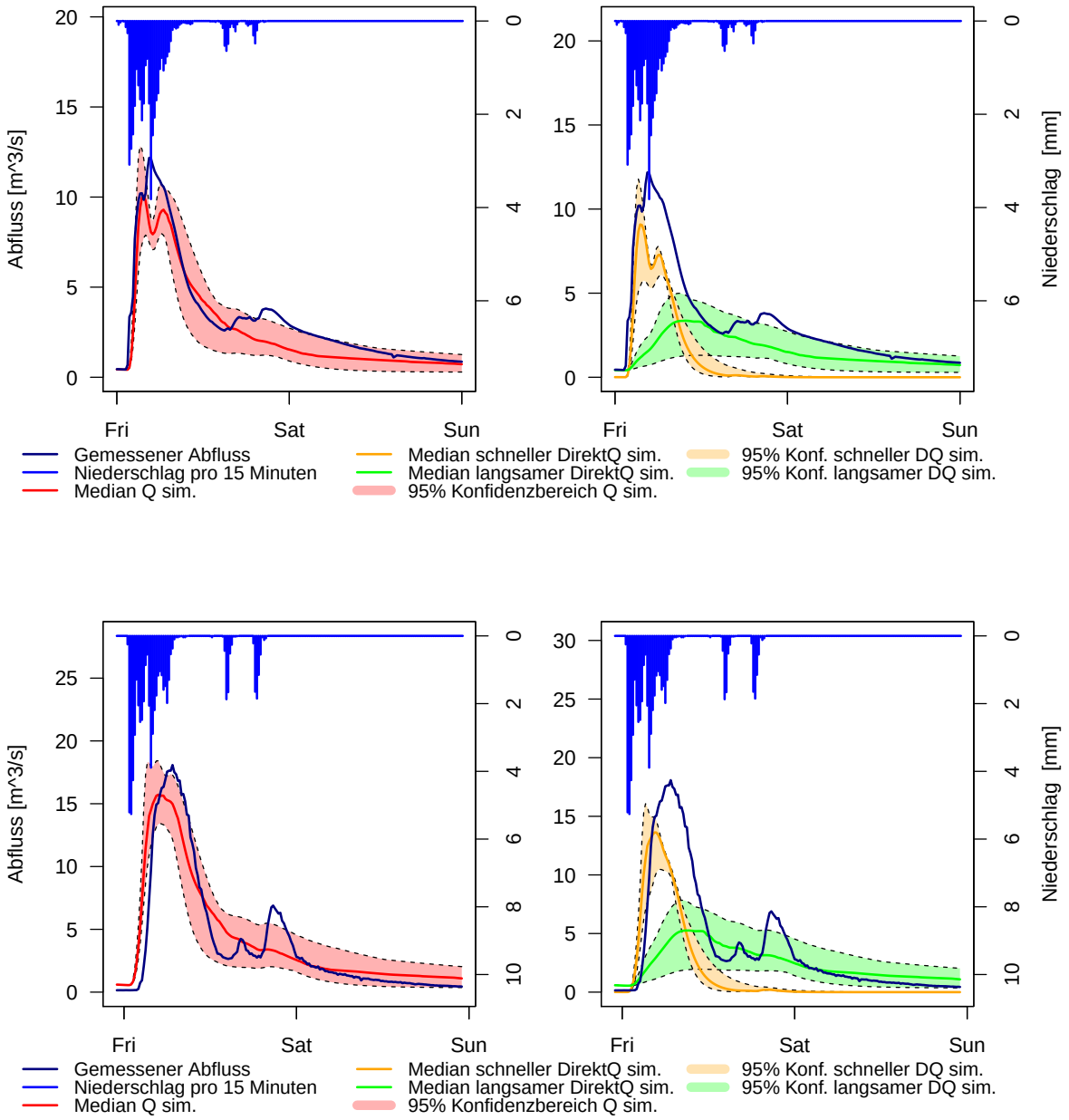

Abbildung A.9: Ergebnisse der besten 77 Parametersets der letzten Monte Carlo Simulationen,ausgewertet nach D, mit gemessenem Abfluss und dem vom Modell berechneten relativen Niederschlag für die Pegelstationen: Oben: Larochette, 2018; Unten: Reisdorf, 2018 . Links: Median und 95% Konfidenzbereich aller Simulationen. Rechts: Median und 95% Konfidenzinterval der langsamen und der schnellen Abflusskomponente

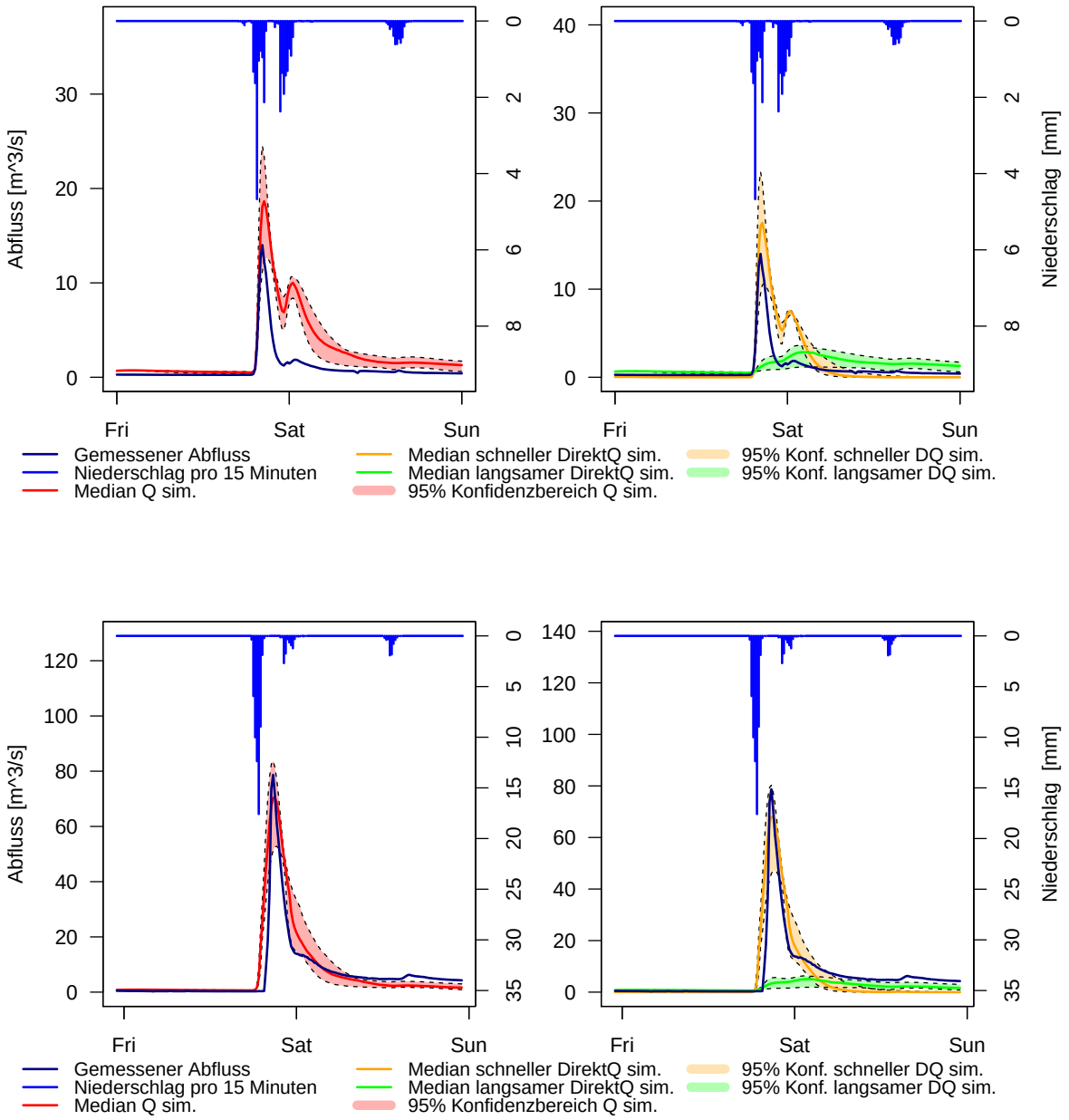

Abbildung A.10: Ergebnisse der besten 77 Parametersets der letzten Monte Carlo Simulationen,ausgewertet nach R^2, mit gemessenem Abfluss und dem vom Modell berechneten relativen Niederschlag für die Pegelstationen: Oben: Larochette, 2016; Unten: Reisdorf, 2016 . Links: Median und 95% Konfidenzbereich aller Simulationen. Rechts: Median und 95% Konfidenzinterval der langsamen und der schnellen Abflusskomponente

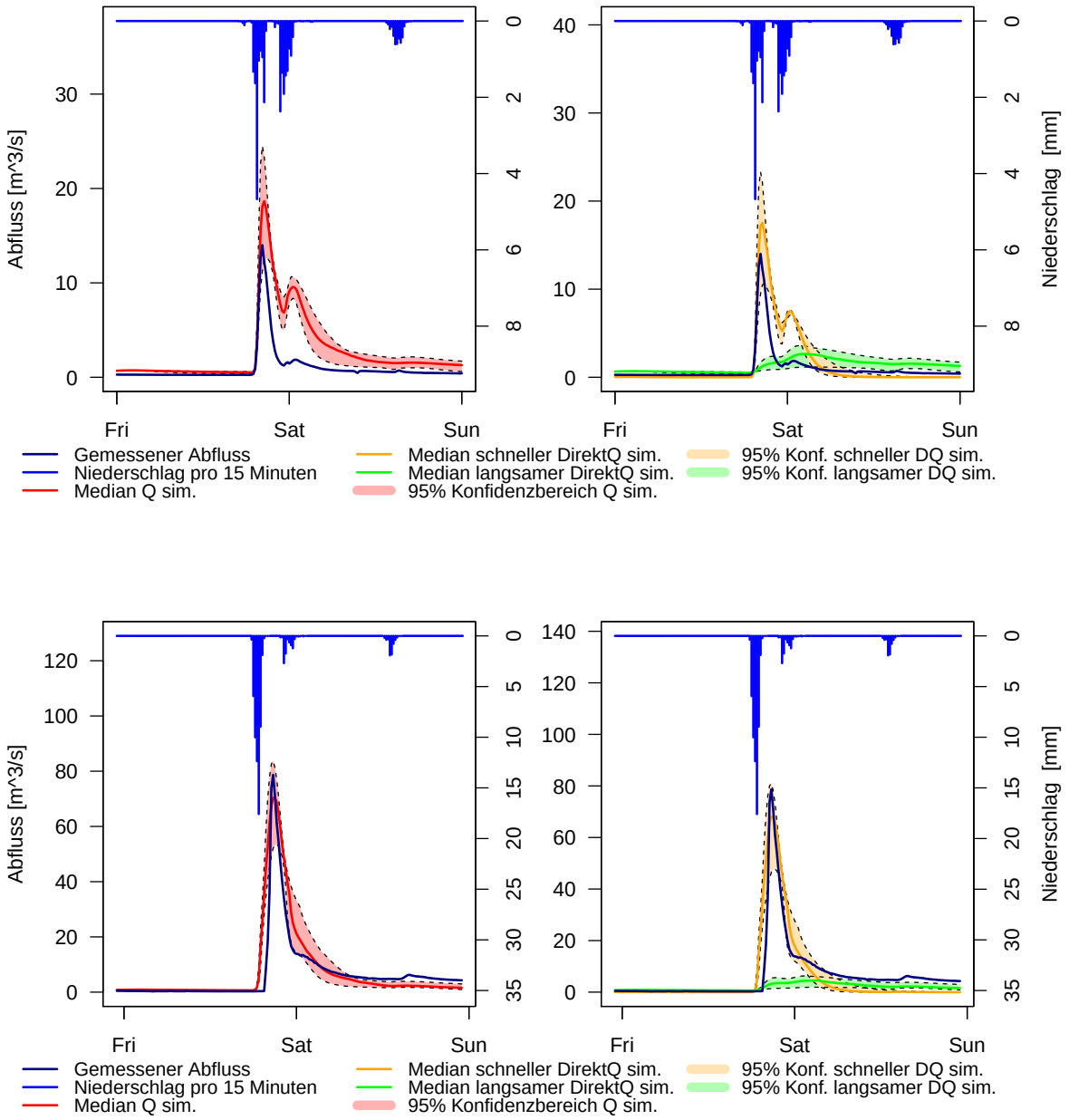

Abbildung A.11: Ergebnisse der besten 77 Parametersets der letzten Monte Carlo Simulationen,ausgewertet nach VE, mit gemessenem Abfluss und dem vom Modell berechneten relativen Niederschlag für die Pegelstationen: Oben: Larochette, 2016; Unten: Reisdorf, 2016 . Links: Median und 95% Konfidenzbereich aller Simulationen. Rechts: Median und 95% Konfidenzinterval der langsamen und der schnellen Abflusskomponente

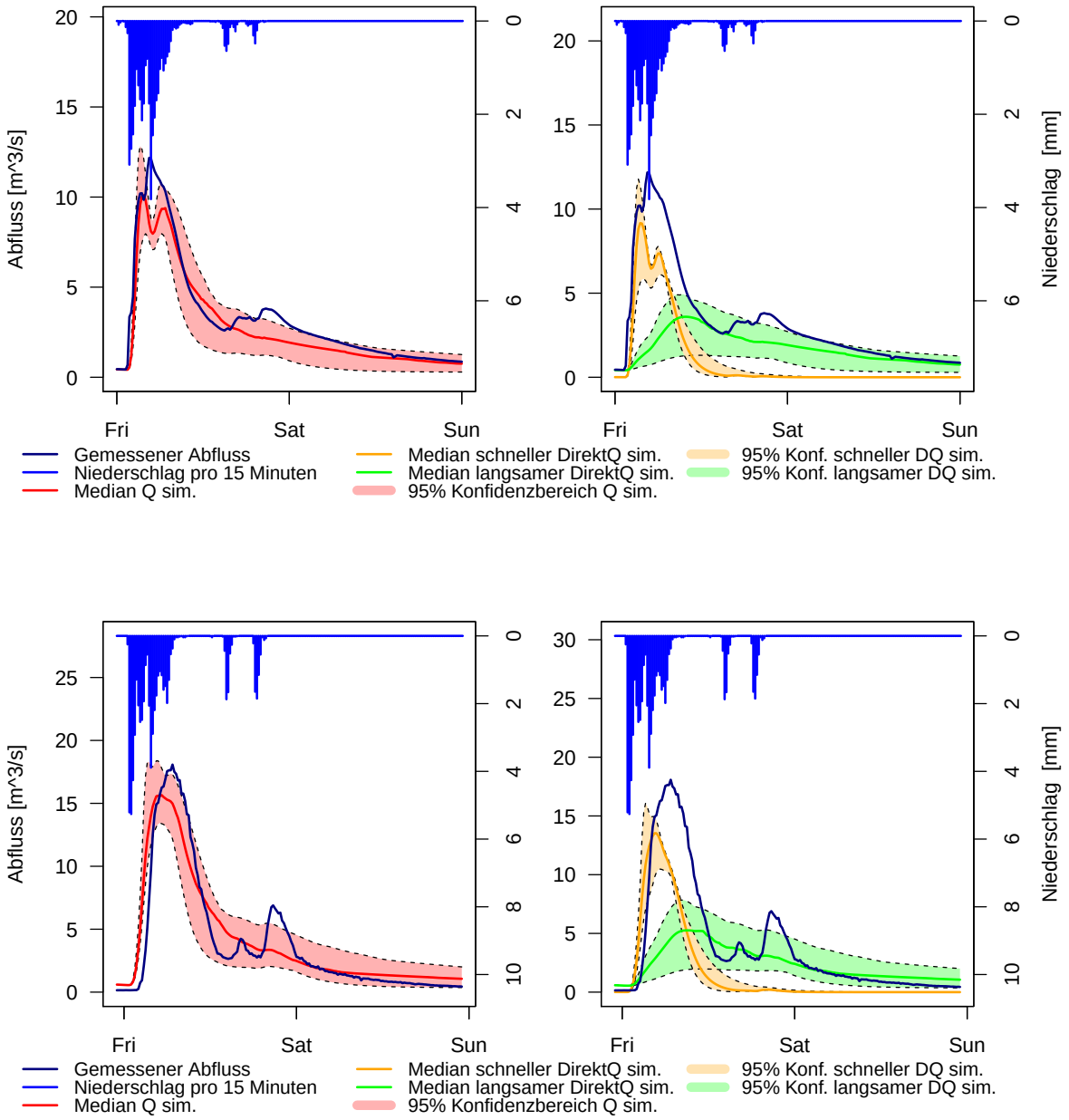

Abbildung A.12: Ergebnisse der besten 77 Parametersets der letzten Monte Carlo Simulationen,ausgewertet nach VE, mit gemessenem Abfluss und dem vom Modell berechneten relativen Niederschlag für die Pegelstationen: Oben: Larochette, 2018; Unten: Reisdorf, 2018 . Links: Median und 95% Konfidenzbereich aller Simulationen. Rechts: Median und 95% Konfidenzinterval der langsamen und der schnellen Abflusskomponente

B Tabellen

Tabelle B.1: In RoGeR berücksichtigte Prozess, zugrunde liegende Methodik und Parameter, nach Steinbrich et al. (2015)

Prozess	Methode	Eingangsparameter
Interzeption	Leaf Area Index parametrisiert nach Bremicker (2000)	Landnutzung, Jahreszeit
Matrix Infiltration	Green& Ampt (1911) für variable Niederschlagsintensitäten nach Peschke (1985]	Niederschlagsintensität, P_{eff}, Vorfeuchte, k_s Boden, SFS, Versieglungsgrad
Makroporenausstattung	Regionalisierung	Landnutzung, Versieglungsgrad, Skelettanteil des Bodens, Bodenmächtigkeit, Grundwasserflurabstand
Makroporen Infiltration	Modifizierte Green& Ampt-Infiltration für eine horizontale, radiale Sättigungsfront nach (Beven & clarke 1986)	Makroporenausstattung, Tiefe, der Sättigungsfront durch Matrixinfiltration, Matrixinfiltrationüberschuss, P_{eff}, Vorfeuchte, k_s Boden, SFS
Trockenriss Infiltration	Modifizierte Green& Ampt-Infiltration für eine horizontale, lineare Sättigungsfront nach (Steinbrich & Weiler 2014)	Tongehalt, Vorfeuchte, Tiefe, der Sättigungsfront durch Matrixinfiltration, Matrixinfiltrationüberschuss, P_{eff}, Vorfeuchte, k_s Boden, SFS
Horton'scher Ober flächenabfluss (HOA)	Infiltrations-Überschuss (Horton 1933)	Niederschlag, Gesamtinfiltration
Grundwasserflurabstand	Vertical Distance to Groundwater (Olaya 2004)	Gewässernetz, Digitales Höhenmodell
Bodenspeicher	Dynamische Bilanzierung	nFK, LK, Bodenwassergehalt, Grundwasserflurabstand
tiefenperkolation (TP)	Gegenüberstellung von Sickerung aus dem Bodenspeicher und k_s Untergrund	nFK-Überschuss k_s Untergrund, Grundwasserflurabstand
Matrix Zwischenabfluss (Matrix-ZA)	Darcy	TP-Überschuss, LK, Boden, Gefälle
Makroporen Zwischenabfluss (MP-ZA)	Tiefen- Gefällabhängige Fließgeschwindigkeiten	TP-Überschuss, LK, Landnutzung Gefälle, Tiefe des Sättigungswasserspiegels
Sättigungsflächenabfluss (SFA)	Dynamische Bilanzierung	LK, ZA-Überschudd, Grundwasser-Flurabstand, Landnutzung
Konzentration Oberflächenabfluss	Geomorphologisches Einheitsganglinienverfahren (GeoUH) oder Dynamisches Abflussouting des Oberflächenabflusses nach Manning-Strickler und des ZA	Landnutzung, Gefälle
Konzentration Zwischenabfluss		Bodenmächtigkeit, Makroporenausstattung, Gefälle, k_s Boden
Konzentration Grundwasserabfluss		k_s Geologie, Gefälle, Fließgeschwindigkeit Karst

Tabelle B.2: Auswertung der Simulation der UTGB Parametersätze anhand der drei auserwählten Teilgebietsparametersets ausgewertet nach D

Parameter-	Larochette 2016			Reisdorf 2016			Larochette 2018			Reisdorf 2018		
Set 1	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%
AuGr	0.754	0.756	25	0.925	0.927	25	0.983	0.983	-12.5	0.918	0.924	25
k_s	0.754	0.786	25	0.925	0.939	10	0.983	0.984	-7.5	0.918	0.921	7.5
LK_{Vol}	0.754	0.766	25	0.925	0.939	25	0.983	0.984	-22.5	0.918	0.924	25
MP_{di}	0.754	0.774	25	0.925	0.939	12.5	0.983	0.984	-12.5	0.918	0.924	22.5
MP_{la}	0.754	0.767	25	0.925	0.940	15	0.983	0.984	-17.5	0.918	0.923	25
nFK_{Vol}	0.754	0.761	25	0.925	0.930	25	0.983	0.984	-22.5	0.918	0.923	25
SchrGr	0.754	0.754	25	0.925	0.925	25	0.983	0.983	-25	0.918	0.918	25
TR_{ti}	0.754	0.755	25	0.925	0.926	25	0.983	0.983	-12.5	0.918	0.924	25
wsf	0.754	0.771	25	0.925	0.940	15	0.983	0.984	-12.5	0.918	0.925	25
Set 2	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%
AuGr	0.698	0.699	25	0.931	0.932	25	0.936	0.940	-25	0.974	0.974	25
k_s	0.698	0.723	25	0.931	0.941	25	0.936	0.946	-20	0.974	0.974	-5
LK_{Vol}	0.698	0.704	25	0.931	0.936	25	0.936	0.942	-25	0.974	0.974	-10
MP_{di}	0.698	0.710	25	0.931	0.940	25	0.936	0.946	-25	0.974	0.974	-7.5
MP_{la}	0.698	0.704	25	0.931	0.939	22.5	0.936	0.945	-25	0.974	0.974	-12.5
nFK_{Vol}	0.698	0.703	25	0.931	0.934	25	0.936	0.943	-25	0.974	0.974	-10
SchrGr	0.698	0.698	25	0.931	0.931	25	0.936	0.936	-25	0.974	0.974	25
TR_{ti}	0.698	0.698	25	0.931	0.931	25	0.936	0.940	-25	0.974	0.974	12.5
wsf	0.698	0.709	25	0.931	0.939	25	0.936	0.947	-25	0.974	0.974	-2.5
Set 3	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%
AuGr	0.830	0.834	25	0.919	0.922	25	0.906	0.909	-25	0.866	0.869	25
k_s	0.830	0.875	25	0.919	0.929	25	0.906	0.944	-25	0.866	0.882	-17.5
LK_{Vol}	0.830	0.848	25	0.919	0.922	2.5	0.906	0.918	-25	0.866	0.867	-5
MP_{di}	0.830	0.860	25	0.919	0.928	25	0.906	0.927	-25	0.866	0.872	-25
MP_{la}	0.830	0.852	25	0.919	0.928	25	0.906	0.923	-25	0.866	0.870	-25
nFK_{Vol}	0.830	0.839	25	0.919	0.923	12.5	0.906	0.919	-25	0.866	0.868	-25
SchrGr	0.830	0.830	25	0.919	0.919	25	0.906	0.906	-25	0.866	0.866	25
TR_{ti}	0.830	0.832	25	0.919	0.920	25	0.906	0.910	-25	0.866	0.867	25
wsf	0.830	0.856	25	0.919	0.921	25	0.906	0.928	-25	0.866	0.868	-22.5
ohne dyn. inf.	0.630			0.903			0.912			0.956		

Tabelle B.3: Auswertung der Simulation der UTGB Parametersätze anhand der drei auserwählten Teilgebietsparametersets ausgewertet nach VE

Parameter-	Larochette 2016			Reisdorf 2016			Larochette 2018			Reisdorf 2018		
Set 1	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%
AuGr	-1.069	-1.058	25	0.576	0.584	25	0.873	0.874	-12.5	0.498	0.508	25
k_s	-1.069	-0.886	25	0.576	0.656	22.5	0.873	0.875	-2.5	0.498	0.502	7.5
LK_{Vol}	-1.069	-0.992	25	0.576	0.635	25	0.873	0.875	-15	0.498	0.507	25
MP_{di}	-1.069	-0.943	25	0.576	0.648	25	0.873	0.876	-7.5	0.498	0.507	17.5
MP_{la}	-1.069	-0.978	25	0.576	0.643	25	0.873	0.876	-12.5	0.498	0.505	25
nFK_{Vol}	-1.069	-1.031	25	0.576	0.600	25	0.873	0.875	-12.5	0.498	0.506	25
SchrGr	-1.069	-1.068	25	0.576	0.577	25	0.873	0.874	-25	0.498	0.499	25
TR_{ti}	-1.069	-1.065	25	0.576	0.580	25	0.873	0.874	-12.5	0.498	0.507	25
wsf	-1.069	-0.961	25	0.576	0.639	25	0.873	0.875	-7.5	0.498	0.509	25
Set 2	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%
AuGr	-0.755	-0.746	25	0.471	0.475	25	0.653	0.657	-25	0.767	0.768	-10
k_s	-0.755	-0.606	25	0.471	0.536	25	0.653	0.653	-5	0.767	0.772	-5
LK_{Vol}	-0.755	-0.698	25	0.471	0.499	25	0.653	0.656	-25	0.767	0.770	-15
MP_{di}	-0.755	-0.658	25	0.471	0.523	25	0.653	0.656	-25	0.767	0.772	-7.5
MP_{la}	-0.755	-0.689	25	0.471	0.518	25	0.653	0.658	-25	0.767	0.772	-17.5
nFK_{Vol}	-0.755	-0.725	25	0.471	0.487	25	0.653	0.656	-25	0.767	0.771	-15
SchrGr	-0.755	-0.754	25	0.471	0.471	25	0.653	0.653	-25	0.767	0.767	-25
TR_{ti}	-0.755	-0.752	25	0.471	0.472	20	0.653	0.658	-25	0.767	0.768	-20
wsf	-0.755	-0.671	25	0.471	0.514	25	0.653	0.657	-22.5	0.767	0.770	-7.5
Set 3	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%	Initial	Best	%
AuGr	-0.309	-0.291	25	0.452	0.464	25	0.587	0.587	-2.5	0.512	0.519	25
k_s	-0.309	-0.098	25	0.452	0.500	25	0.587	0.644	-25	0.512	0.521	-17.5
LK_{Vol}	-0.309	-0.221	25	0.452	0.469	10	0.587	0.597	-25	0.512	0.513	-5
MP_{di}	-0.309	-0.164	25	0.452	0.502	25	0.587	0.608	-25	0.512	0.513	-2.5
MP_{la}	-0.309	-0.204	25	0.452	0.499	25	0.587	0.601	-25	0.512	0.512	-2.5
nFK_{Vol}	-0.309	-0.266	25	0.452	0.475	12.5	0.587	0.598	-25	0.512	0.513	-5
SchrGr	-0.309	-0.308	25	0.452	0.452	17.5	0.587	0.587	-17.5	0.512	0.513	25
TR_{ti}	-0.309	-0.299	25	0.452	0.454	25	0.587	0.587	-2.5	0.512	0.517	25
wsf	-0.309	-0.186	25	0.452	0.479	25	0.587	0.608	-25	0.512	0.513	-2.5
ohne dyn. inf.	0.944			0.420			0.638			0.700		

Liste der verwendeten Symbole

Name	Einheit	Symbol
Administration de la Gestion de l'Eau		AGE
Administration des Ponts et Chaussées		PCH
Administration des Services Techniques de l'Agriculture		ASTA
All-At-a-Time		AAT
Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion		BSF
Deutscher Wetterdienst		DWD
Digitales Geländemodell		DTM
Effektive Porosität		P_{eff}
Einzugsgebiet		EZG
Freie Luftkapazität		LK
Freie Nutzbare Feldkapazität		nFK
Globale Sensitivitätsanalyse		GSA
Generalized Likelihood Uncertainty Estimation		GLUE
Hornberger-Spear and Young		HSY
Horton'scher Oberflächenabfluss	$[m^3s^{-1}]$	HOA
Hydraulische Leitfähigkeit	$[mmh^{-1}]$	k_s
Hydrological Response Unit		HRU
Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg		LUBW
Large Area Runoff Simulation Modell		LARSIM
LARSIM Entwicklergemeinschaft		LEG
Leaf Area Index		LAI
Lokale Sensitivitätsanalyse		LSA
Makroporendichte		MP_{di}
Makroporenlänge	[mm]	MP_{la}
Model of Anticipation of Runoff and Inudations for Extreme Events		MARINE
Monte Carlo		MC
Monte Carlo Filtering		MCF
Oberflächennaher Abfluss	$[m^3s^{-1}]$	SSF
One-At-a-Time		OAT
Reginale Sensitivitätsanalyse		RSA
Runoff Generation Research		RoGeR
Sacramento Soil Moisture Account		SAC-SMA
Saugspannung an der Sättigungsfront	[mm]	wsf
Sättigungsflächenabfluss	$[m^3s^{-1}]$	SFA
Sensitivitätsanalyse		SA
Soil Consercative Service		SCS
Teilgebiet		TGB
Tiefenperkolation	$[m^3s^{-1}]$	TP

Trockenrisstiefe		TR_{ti}
Two-Dimensional, Runoff, Erosion and Export		TREX
Unsicherheitsanalyse		UA
US National Weather Service		NWS
Unterteilgebiet		UTGB
Vereinbarungsindex		d
Volumetrische Effizienz		VE
Wassergehalt bei der Ausrollgrenze als Prozent der nFK	[% nFK]	AusrGr100
Wassergehalt bei der Schrumpfungsgrenze als Prozent der nFK	[% nFK]	SchrGr100
Wasserhaushaltsmodell		WHM
Zwischenabfluss	[m^3s^{-1}]	ZA

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass diese Masterarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Freiburg, den 15. März 2021 Georges Bruns