



Eidg. Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft WSL



Scherrer AG
Hydrologie und Hochwasserschutz



Frühwarnung vor Hochwasser-Ereignissen: Überprüfung von einem prozessnahen Abflussbildungsmodell auf der Hangskale und für klein- und mesoskalige Gebiete

13.0039.PJ / N465-0499

SCHLUSSBERICHT

Stand 9/2017

Erstellt im Auftrag von:

Bundesamt für Umwelt BAFU

CH-3003 Bern

Auftragnehmer:

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Zürcherstrasse 111

CH-8903 Birmensdorf

Projektbearbeitung:

Manuel Antonetti (WSL)

Dr. Peter Kienzler (Scherrer AG Hydrologie und Hochwasserschutz)

Michael Margreth (SoilCom GmbH)

Projektleitung:

Dr. Massimiliano Zappa (WSL)

Dr. Simon Scherrer (Scherrer AG Hydrologie und Hochwasserschutz)

Birmensdorf, den 29. September 2017

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	5
1 Einleitung.....	6
2 Das prozessnahe Abflussbildungsmodul.....	7
2.1 Wissenschaftliches Problem und Relevanz.....	7
2.2 Modellierungsstrategie.....	8
2.3 Modellstruktur.....	9
2.4 Aktivierung und Initialisierung des Modells.....	10
3 Parametrisierung des prozessnahen Abflussbildungsmodells.....	12
3.1 Vorgehen.....	12
3.2 Die künstliche Beregnung von Hängen zur Untersuchung der Abflussprozesse.....	12
3.3 Abflussreaktionskurven.....	15
3.4 Festlegung der Parameterbereiche.....	16
3.4.1 Bodenfeuchte- bzw. Abflussspeicher und Abflussspeichergrenzwert.....	16
3.4.2 Speicherkonstanten für den oberirdischen und unterirdischen Abfluss.....	17
3.4.3 Perkolation in den Grundwasserspeicher.....	17
3.4.4 Abflusskonzentration und Wellenverformung.....	17
3.5 Parametrisierungsstrategien.....	18
3.6 Übertragung der a-priori festgelegten Parameterbereiche auf EZG.....	20
4 Fallstudien.....	23
4.1 Einleitung.....	23
4.2 Fallstudie 1: Klein-Einzugsgebiete bis ca. 2 km ² mit guten Niederschlag- und Abflussdaten (aber kurzer Messperiode).....	23
4.2.1 Untersuchungsgebiete.....	23
4.2.2 Verwendete Zielfunktionen.....	25
4.2.3 Vergleich zwischen dem prozessnahen Abflussbildungsmodul und dem traditionellen PREVAH.....	26
4.3 Fallstudie 2: Mesoskalige Einzugsgebiete (4 resp. 22 km ²) mit allgemein verfügbarem Niederschlagsinput (CombiPrecip).....	27
4.3.1 Untersuchungsgebiete Dorfbach (Meilen) und Reppisch (Birmensdorf) und deren Kartierung.....	27
4.3.2 Ergebnisse der Simulationen.....	30
4.4 Fallstudie 3: Grosse Einzugsgebiete am Beispiel der Emme (443 km ²).....	32
4.4.1 Einzugsgebietsbeschreibung.....	32
4.4.2 Abflussprozesskarte für die gesamte Emme oberhalb Emmenmatt.....	37
4.4.3 Ergebnisse der Simulationen.....	39
5 Schlussfolgerungen.....	47

Anhänge

Anhang A	Optimierte Parameterbereiche gemäss BVO-Strategie
Anhang B	Optimierte Parameterbereiche gemäss ATO-Strategie
Anhang C	Mit den verschiedenen Parametrisierungen simulierte Ganglinien
Anhang D	Fallstudie 1 - Ergebnisse des Vergleichs zwischen dem prozessnahen Abflussbildungsmodul und dem traditionellen PREVAH
Anhang E	Standorte der Überprüfung der automatisiert hergeleiteten Abflusstypenkarte im Feld
Anhang F	Grafische Darstellungen von jedem einzelnen Ereignis in jedem Gebiet (nicht ausgedruckt)
Anhang G	Parameterwerte nach Viviroli et al. (2009b) für jedes EZG
Anhang H	Fallstudie 2 - Ergebnisse des Vergleichs zwischen dem prozessnahen Abflussbildungsmodul und dem traditionellen PREVAH
Anhang I	Wissenschaftliche Veröffentlichung: Antonetti, M., Buss, R., Scherrer, S., Margreth, M., and Zappa, M.: Mapping dominant runoff processes: an evaluation of different approaches using similarity measures and synthetic runoff simulations, Hydrol. Earth Syst. Sci., 20, 2929-2945, doi:10.5194/hess-20-2929-2016, 2016.
Anhang J	Wissenschaftliche Veröffentlichung: Antonetti, M., Scherrer, S., Kienzler, P., Margreth, M., und Zappa, M., 2016. Überprüfung von einem prozessnahen Abflussbildungsmodul auf der Hangskale und für klein- und mesoskalige Gebiete. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 36.16, S. 63-74.
Anhang K	Wissenschaftliche Veröffentlichung: Antonetti M., Scherrer S, Kienzler P., Margreth M, Zappa M. Process-based hydrological modelling: The potential of a bottom-up approach for runoff predictions in ungauged catchments. Hydrological Processes. 2017a;31:2902–2920. doi:10.1002/hyp.11232
Anhang L:	Die automatisierte Kartierung der Abflussprozesse am Beispiel der Emme.

Abkürzungsverzeichnis

AT	Abflusstyp
ATK	Abflusstypenkarte
ATO	Optimierte Parametrisierung basierend auf Abflusstypen
BV	Beregnungsversuch
BVO	Optimierte Parametrisierung basierend auf Beregnungsversuche
BWHG	Bodenwasserhaushaltsgruppe
CBETA	Infiltrationsparameter
CPERC	maximale Perkulationsintensität
DP	Deep Percolation – Versickerung
DRP	Dominant Runoff Process – Dominanter Abflussbildungsprozess
DTM	Digital Terrain Model – Höhenmodell
EZG	Einzugsgebiet
GUI	Graphical User Interface - Grafische Benutzeroberfläche
HOF	Hortonian Overland Flow – Horton'scher oberirdischer Abfluss
K0H	Speicherkonstanten des oberirdischen Abflusses
K1H	Speicherkonstanten des unterirdischen Abflusses
KGE	Kling-Gupta-Effizienz
MC	Montecarlo Simulation
NSE	Nash-Sutcliffe-Effizienz
OA	Oberirdischen Abfluss
OMM	Obere Meeresmolasse
OSM	Obere Süßwassermolasse
PREVAH	Precipitation-Runoff-EVApotranspiration HRU Model
RMSE	Root-Mean-Square-Error - Mittlere quadratische Abweichung
SGRLUZ	Speichergrenzwert des oberirdischen Abflusses
SOF	Saturation Overland Flow – Gesättigter Oberflächenabfluss
SSF	Subsurface Flow – Unterirdischer Abfluss
SSM	Speicher für die Pflanzen verfügbare Bodenfeuchte
SUZ	Abflussspeicher
UA	Unterirdisches Abfluss
USM	Untere Süßwassermolasse

Zusammenfassung

In dieser Studie wurde das prozessbasierte Abflussbildungsmodell DRP-PREVAH auf verschiedenen Skalen eingesetzt und die Leistung des Modells beurteilt. Das Modell enthält ein neues Abflussbildungsmodul (**R**unoff **G**eneration **M**odul PREVAH, RGM PREVAH) das Informationen der räumlichen Verteilung dominanter Abflussbildungsprozesse verwendet. Diese Informationen stammen von sogenannten Abflusstypenkarten. (Abflusstypen fassen Flächen mit ähnlich wirksamen dominanten Abflussprozessen zusammen). Die Innovation des Modells liegt in der Sub-Parametrisierung der Abflussprozesse, indem jedem Abflusstyp ein spezifisches Linearspeichersystem für jede Berechnungszelle zugeordnet wird.

Das Modell wurde a-priori parametrisiert, indem vier verschiedene Parametrisierungen – zwei auf Abflusstypen und zwei auf Beregnungsversuche basierend – entworfen und getestet wurden. Drei Fallstudien in unterschiedlichen Skalenbereichen wurden durchgeführt. Im ersten Fall wurde mit Niederschlags-Inputdaten von Bodenstationen gearbeitet, bei Fall 2 und 3 mit den schweizweit räumlich hoch aufgelösten und auf Radardaten und Bodenstationen beruhenden CombiPrecip-Daten. Die Unterschätzung des Abflusses durch die auf Beregnungsversuche basierenden Parametrisierungen zeigt, dass die bilanzmässig ermittelten Perkulationsraten von intensiven, mikroskaligen Beregnungsversuchen nicht 1 : 1 auf Einzugsgebiete übertragen werden dürfen. Diese Intensitäts- und Skalenprobleme wurden mit den auf Abflusstypen basierenden Parametrisierungen umgangen.

Die beste Parametrisierung, welche auf Abflusstypen mit optimierten Parameterbereichen basierten, wurde in zwei EZG (Isert und Ror) angewendet. Diese Gebiete zeigen grosse Unterschiede der Abflussreaktion auf Starkregen, was diesen Test interessant macht. Die Ergebnisse zeigten, dass das DRP-PREVAH diese Reaktionsunterschiede nachbildet und sowohl bei den Abflussspitzen als auch bei den Abflussvolumen besser abschneidet als das herkömmliche PREVAH.

Fallstudien 2 und 3 wurde in EZG mit räumlich verteilten Niederschlagsdaten (CombiPrecip) durchgeführt. Das Modell wurde u.a. mit zwei Konfigurationen des traditionellen PREVAHs (kalibriert und nicht kalibriert) und mit den regionalisierten Modellparametern nach Viviroli et al. (2009b) verglichen. Die Ergebnisse zeigten, dass das prozessnahe Modul durchschnittlich bessere Leistungen erreichte. Auch in diesen grösseren EZG (Dorfbach Meilen, Reppisch bis Birmensdorf, Emme bis Emmenmatt) konnten sowohl der zeitliche Verlauf als auch die Abflussvolumen besser nachgebildet werden.

Der Vergleich zwischen berechneten Abflüssen und den tatsächlich beobachteten Abflüssen zeigte, dass die Abflussspitzen oft etwas zu klein sind und die Abflussanstiege zu langsam sind. Der Grund dafür dürfte von der Abflusskonzentration des unterirdischen Abflusses herrühren, der im Augenblick noch mit einem einzigen Speicher modelliert wird. Dies wird gleichzeitig als einer der wichtigsten Schritte zur Verbesserung des DRP-PREVAH angesehen. Weitere Verbesserungsvorschläge wurden formuliert. In der 3. Fallstudie konnte die Güte des Modells an zwei Pegelstellen nicht abschliessend beurteilt werden, weil systematische Abweichungen auftraten.

1 Einleitung

Im Juni 2013 erteilte das Bundesamt für Umwelt BAFU der *Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL* und den privaten Büros *Scherrer AG Hydrologie und Hochwasserschutz* und *Soilcom GmbH* den Auftrag, das Pilotprojekt „Prozessbasiertes Abflussbildungsmodul“ (Vertrags-Nr. 13.0039.PJ/M184-1423) zu bearbeiten. Ziel jenes Projektes war die Realisierung einer neuen Abflussbildungsroutine für das an der WSL entwickelte und betriebene hydrologische Modell PREVAH (Viviroli et al., 2009a). Die Innovation des neuen Abflussbildungsmoduls (**R**unoff **G**eneration **M**odul PREVAH, RGM PREVAH), das Informationen der räumlichen Verteilung dominanter Abflussbildungsprozesse verwendet, besteht im direkten Einbezug von räumlich verteilten Prozessinformationen aus sog. Abflussprozesskarten, welche aufgrund von Feldaufnahmen und geographischen Grundlagen erstellt werden. Bis anhin können nur wenige Niederschlag-Abflussmodelle Informationen von Abflussprozesskarten abgreifen (z.B. QArea: Naef & Scherrer, 2003; QArea-pro: Schmocker-Fackel, 2004). Da es sich bei diesen Modellen um „Ereignismodelle“ handelt, können keine längeren Abflussperioden simuliert werden.

Die Hauptaufgaben des Pilotprojektes gemäss Offerte vom 10. Juli 2012 waren (a) eine gründliche Literaturstudie zum Stand der Forschung bezüglich der Integration von Prozessverständnis in konzeptionelle hydrologische Modelle, (b) die Entwicklung und Implementierung einer Strategie zur Inwertsetzung der Abflussprozesskarten und (c) die Bearbeitung von verschiedenen Fallstudien in mittelländischen und voralpinen Einzugsgebieten (EZG).

Angesichts der vielversprechenden Erkenntnisse aus dieser Pilotstudie wurde November 2014 das Folgeprojekt (Vertrags-Nr. 13.0039.PJ/N465-0499) mit dem Ziel bewilligt, die Anwendbarkeit des prozessnahen Abflussbildungsmoduls für die Hangskale und für klein- und mesoskalige Gebiete zu erweitern. Gemäss Offerte vom 27. Oktober 2014 gehören folgende Hauptaufgaben zum Folgeprojekt:

- a) Die Nachrechnung von Beregnungsversuchen zur a-priori Festlegung der Modellparameter;
- b) Programmierung der Abflusskonzentration und Festlegung der entsprechenden Parameter;
- c) Die Überprüfung der Parameter in klein- und mesoskaligen EZG sowie der Bereitstellung von Prozesskarten, Niederschlag- und Abflussdaten für ein neues Gebiet (Emme bis Emmenmatt, 440 km²).

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse aus diesem Folgeprojekt beschrieben. In Kapitel 2 wird eine kurze Übersicht über das prozessbasierte Abflussbildungsmodell gegeben. Die wissenschaftliche Relevanz, die Parametrisierungsstrategie, die Modellstruktur und die Aktivierung des Modells wird kurz beschrieben. In Kapitel 3 wird im Detail auf die Vorgehensweise eingegangen, wie man von Beregnungsversuchen zu Abflusstypen und schliesslich zu Parameterbereichen gelangt. Die Strategie bei der Parametrisierung des Modells wird mittels Nachrechnung von Beregnungsversuchen vorgestellt. Kapitel 4 zeigt 3 Fallstudien: Die erste zeigt die Ergebnisse aus der Modellanwendung in zwei kleinen EZG (Isert und Ror), wo zuverlässige Niederschlags- und Abflussdaten vorhanden sind. Fallstudien 2 und 3 sind grössere EZG, wo auf Radardaten und Bodenstationen gestützte CombiPrecipdaten eingesetzt wurden. Die Ergebnisse aus dem Vergleich zwischen dem traditionellen PREVAH und dem neuen Abflussbildungsmodul RGM PREVAH, das Informationen der räumlichen Verteilung dominanter Abflussbildungsprozesse verwendet, werden gezeigt und diskutiert. Im Kapitel 6 wird das Fazit gezogen, indem die Modellgüte kritisch dargelegt und Verbesserungsvorschläge gemacht werden.

Bestandteil des vorliegenden Berichts ist eine wissenschaftliche Veröffentlichung in *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, eine Publikation in *Hydrology and Earth System Sciences*, sowie ein Artikel in *Hydrological Processes*.

2 Das prozessnahe Abflussbildungsmodul

2.1 Wissenschaftliches Problem und Relevanz

Die gegenwärtigen Module zur Beschreibung der Abflussbildung in konzeptionellen hydrologischen Modellen sind stark auf Kalibrierungen angewiesen, denn sie simulieren den Abfluss in EZG ohne Messungen meist nicht mit der erforderlichen Genauigkeit. In den letzten Jahren wurden deutliche Fortschritte hinsichtlich des Prozessverständnisses erzielt. Basierend auf Berechnungsversuchen (Scherrer 1997; Kienzler 2007) wurden zum Beispiel Kriterien festgelegt, unter welchen Standortigenschaften welcher Abflussprozess zu erwarten ist (Scherrer und Naef, 2003; Scherrer et al, 2007). Darauf aufbauend wurde ein Bestimmungsschlüssel für die Kartierung hochwasserrelevanter Flächen entwickelt (Scherrer AG, 2006). Welche Abflussprozesse an einem Standort auftreten und welcher Abflusstyp dominiert, hängt von der Mächtigkeit, Struktur und Oberfläche des Bodens, vom geologischen Untergrund, von der Topographie, der Landnutzung und dem Niederschlag ab (Scherrer und Naef 2003). Die Prozesse, welche eine ähnliche Reaktion auslösen, werden in sogenannten Abflusstypen zusammengefasst (vgl. Tab. 1).

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

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

2.2 Modellierungsstrategie

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

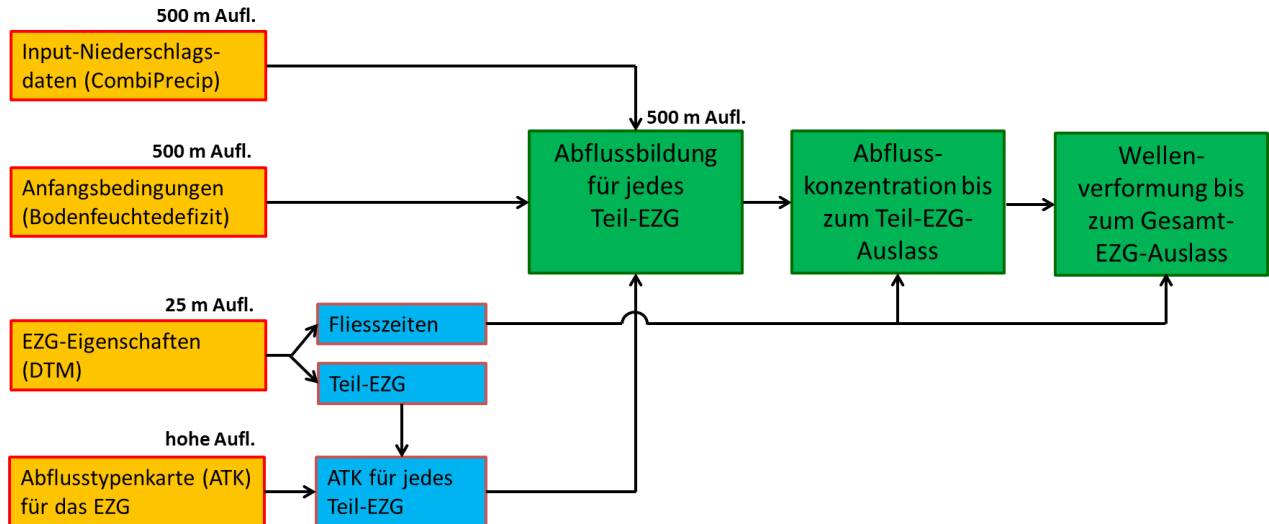


Abb. 1: Das Flussdiagramm stellt die Strategie der Integration von Prozessinformation in das hydrologische Modell dar.

Mit Hilfe eines Höhenmodells (DTM) wird das gesamte Untersuchungsgebiet in verschiedene, bis zu 2 km² grosse **Teil-EZG** unterteilt. Die Abflusstypenkarte (ATK) des EZG weist aus, wo und wie stark Abfluss entsteht. Diese Information definiert für jedes EZG die Abflussreaktion. Die **Abflussbildung** wird somit für jedes Teil-EZG berechnet. Die **Abflusskonzentration** auf der Landoberfläche bis zum Teilgebietsauslass wird separat unter Berücksichtigung der Fliesszeiten berechnet, während für die Konzentration des unterirdischen Abflusses ein linearer Gebietsspeicher verwendet wird. Die **Wellenverformung** im Gerinne bis zum Gebietsauslass wird danach entkoppelt anhand der berechneten Fliesszeiten simuliert. Für jeden Auslass der berechneten Teil-EZG wird eine charakteristische **Fliesszeit** in den Gerinnen bis zum Gebietsauslass mit dem TANALYS-Tool (Schulla 1997) berechnet. Da Niederschlagsdaten und Abflusstypenkarte eine unterschiedliche Auflösung haben, werden die Anteile der Abflusstypen jeder Zelle zu 500x500 Meter-grossen Zellen zusammengefasst. Dieses Verfahren ermöglicht einen vertretbaren Rechenaufwand und vermeidet gleichzeitig Informationsverluste durch die Gitterauflösung (Carver et al., 2009; Nijzink et al., 2016).

2.3 Modellstruktur

Die wichtigsten Eigenschaften des im Rahmen dieses Projektes entworfenen Abflussbildungsmoduls werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst. Eine ausführliche Beschreibung des prozessbasierten Modells gibt Antonetti et al. (2017).

Abbildung 2a zeigt die konzeptionelle Struktur des Abflussbildungsmoduls des **traditionellen PREVAH** (Viviroli et al. 2009a). In den Bodenspeicherspeicher (SSM) und in das Linearspeichersystem für die Abflussbildung (SUZ) gehen der Bestandesniederschlag P_b [mm/h] und, falls vorhanden, das Schmelzwasser der Schneedecke ein. Ein Exponentialparameter CBETA teilt die Anteile des Bestandesniederschlags zwischen den beiden Speichern auf. Der Ausgang des Bodenfeuchtespeichers SSM führt in den Abflussspeicher SUZ. Von diesem gehen zwei Ausgänge raus, einerseits der schnelle Oberflächenabfluss und andererseits der verzögerte Zwischenabfluss im Boden. Diese zwei Auslässe werden durch zwei Speicherkonstanten K_{0H} bzw. K_{1H} gesteuert, während ein Speichergrenzwert SGRLUZ zur Aktivierung des oberirdischen Abflusses dient. Zudem führt eine Versickerungskomponente mit einer maximalen Intensität CPERC in die unteren Grundwasserspeicher. Abflussbildung, Abflusskonzentration und Wellenverformung werden gekoppelt berechnet. Die dazu notwendigen Parameter werden durch die Eichung an einer gemessenen Ganglinie ermittelt. Durch die zentrale Rolle der Eichung dürfte das traditionelle PREVAH für EZG ohne Abflussmessstationen und damit ohne Eichmöglichkeiten wahrscheinlich eher schwache Resultate liefern.

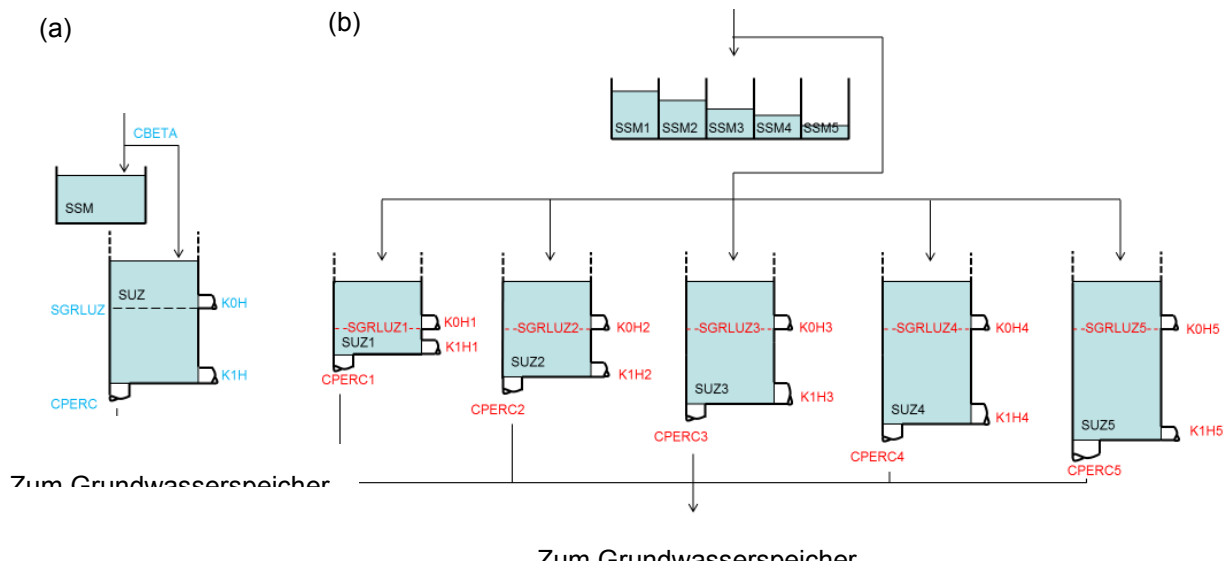


Abb. 2: (a) Das traditionelle Abflussbildungsmodul von PREVAH verändert nach Viviroli et al. (2009a). (b) Das prozessbasierte Abflussbildungsmodul. Rote bzw. blaue Beschriftungen beziehen sich auf a-priori bestimmbare bzw. zu kalibrierende Parameter. Rote bzw. blaue Beschriftungen beziehen sich auf zu kalibrierende bzw. a-priori feststellbare Parameter.

Für das **prozessbasierte Abflussbildungsmodul** (Abb. 2b) wurde – in Anlehnung an die traditionelle Struktur von PREVAH – eine Modellstruktur entworfen, die aus einem Bodenwasserspeicher (vgl. Abb. 2b, oberste Speichergruppe), einem Linearspeichersystem für die Abflussbildung (vgl. Abb. 2b, untere Speichergruppe) und einem Grundwasserspeicher besteht. Dies bedeutet, dass jeder der 5 Abflusstypen der ATK aus einem eigenen Linearspeicher besteht, während im traditionellen PREVAH das Abflussbildungsmodul nur einen Speicher umfasst. Die Innovation liegt in der Sub-Parametrisierung der Abflussprozesse, indem jedem der 5 Abflussbildungstypen ein entsprechendes Linearspeichersystem für jede Zelle zugeordnet wird (Abb. 3). Je nach Art des hinter dem Abflusstypen stehenden Prozesses können die Parameter a priori festgelegt werden (vgl. Kap. 3).

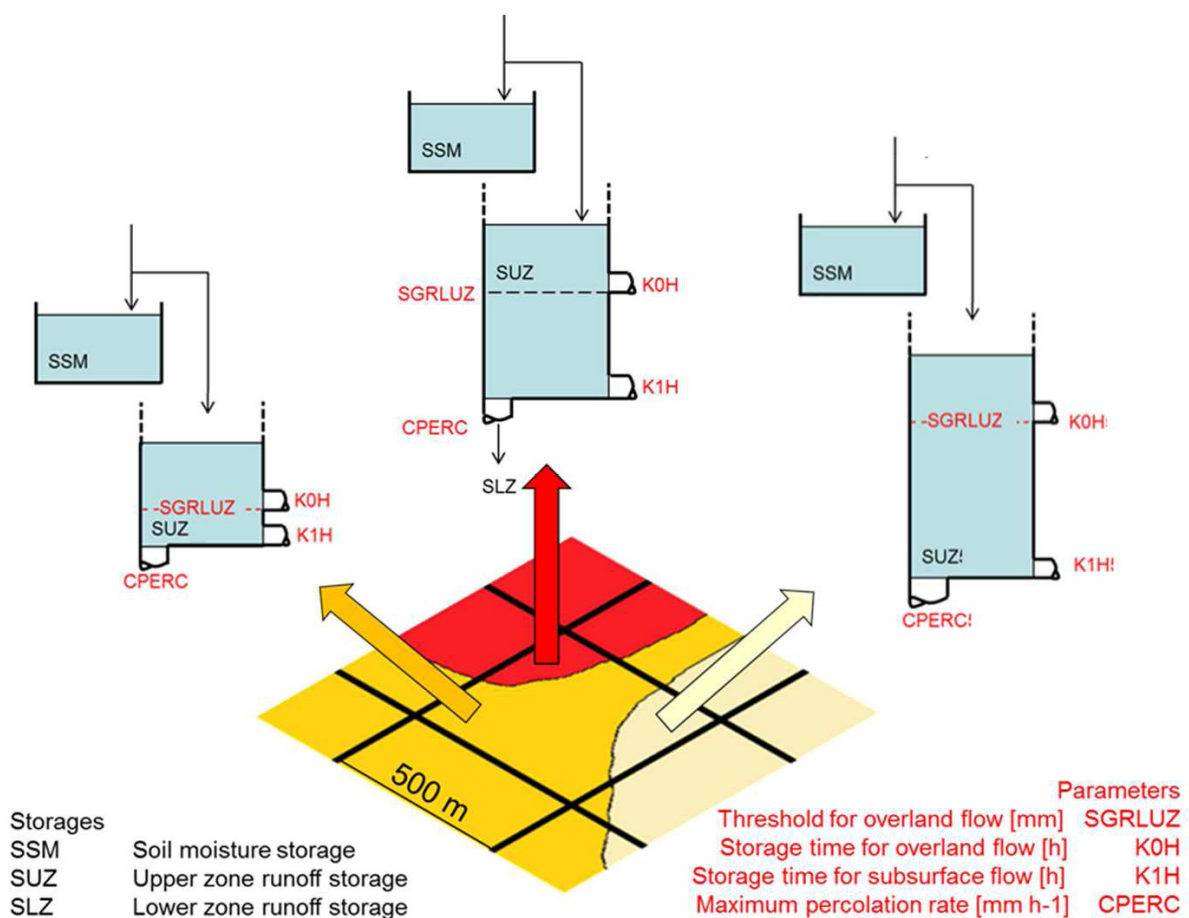


Abb. 3: Die Modellstruktur des Abflussbildungsmoduls aufgezeigt an einer Zelle mit 3 Abflusstypen (rot, gelb und hellgelb).

2.4 Aktivierung und Initialisierung des Modells

Im Rahmen seiner Masterarbeit versuchte Christoph Horat – Masterstudent am Institut für Atmosphäre und Klima der ETH – das prozessbasierte Modell mit einem, an der WSL entwickelten, Hochwasser-Prognose-System zu koppeln (Horat, 2017). Wird eine bestimmte Schwelle überschritten, kann das Modell mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung lokale Ereignisse prozessnah simulieren. Die Anfangsbedingungen für die Simulationen – d. h. das Bodenfeuchtedefizit vor dem Ereignisbeginn – werden aus kontinuierlichen Simulationen von PREVAH mit einer Auflösung von 500 Meter eingelesen.

Da die räumliche Variabilität der Bodenfeuchte deutlich höher als die Modellauflösung ist, wurde eine Downskalierungsmethode nach Blöschl et al. (2009) verwendet (vgl. Abb. 4). Dieser Ansatz beruht grundsätzlich auf drei Annahmen:

- Das Bodenfeuchtemuster ist zeitinvariant, d. h. die räumliche Verteilung der Bodenfeuchte hängt nur von räumlichen Eigenschaften des EZGs ab. Da die Abflussprozesskarte bereits hochaufgelöste Informationen bezüglich des Speicherverhaltens der Böden beinhaltet, wird sie als statischer Beschreiber für die Downskalierung der Bodenfeuchte verwendet.
- Die räumliche Varianz der Bodenfeuchte auf der regionalen (gröberen) Skala σ_{R^2} ist mit derjenigen auf der lokalen (hochaufgelösten) Skala σ_{L^2} verbunden. Diese Annahme erlaubt es, die räumliche Varianz der Bodenfeuchte von der regionalen auf die lokale Skala mit folgendem Potenzgesetz abzuleiten:

$$\sigma_{L^2} = \sigma_{R^2} \cdot \left(\frac{L_L}{L_R} \right)^{-\alpha}$$

wobei L_L und L_R die Gittergrösse der regionalen bzw. lokalen Skala sind und α einem empirischen Exponenten (0.35 nach Blöschl et al., 2009) entspricht.

- Bodenfeuchte ist masserhaltend, d.h. der durchschnittliche Wert der Bodenfeuchte auf der lokalen Skala muss demjenigen auf der regionalen Skala entsprechen.

Die Bodenfeuchte wurde somit zuerst auf eine Auflösung von 25 Meter downskaliert und folglich gemittelt, um einen einzigen Wert pro Abflusstop innerhalb einer Zelle zu bekommen.

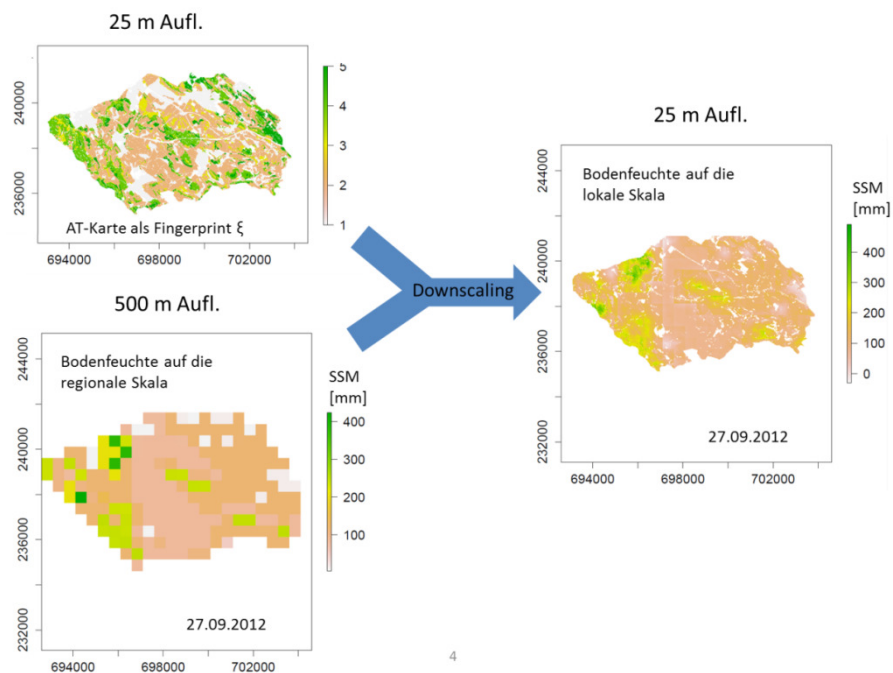


Abb. 4: Schema der verwendeten Strategie zur hydrologischen Downskalierung der Bodenfeuchte.

3 Parametrisierung des prozessnahen Abflussbildungsmodells

3.1 Vorgehen

Um eine möglichst prozessnahe Parametrisierung des Abflussbildungsmodells zu erreichen, wurde auf experimentell beobachtete Abflussreaktionen und Abflussprozessanalysen zurückgegriffen. Schon in Kleinst-EZG von wenigen Hektaren spielen schon verschiedene Abflussprozesse bei der Abflussbildung eine Rolle. Die bei künstlicher Beregnung von kleinen Hangparzellen gemachten Beobachtungen können diese Heterogenität zwar nicht vollends ausschalten, jedoch zu einem grossen Teil eliminieren, weil gezielt möglichst homogene Hangflächen für die Versuche ausgesucht wurden. An insgesamt über 20 Standorten haben Scherrer (1997) und Kienzler (2007) auf diese Weise ein grosses Set solcher gut beschriebener Hangflächen bereitgestellt. Von diesen Hängen kennt man einerseits den Bodenaufbau (Textur, Porosität, Mächtigkeit, Geologie, Bewuchs, Topographie) sehr genau und andererseits wurden die Abflussreaktionen bei unterschiedlichen Ausgangsbedingungen beobachtet und gemessen. Diese Beregnungsversuche und die daraus abgeleiteten Abflusstypen und Abflussreaktionskurven wurden daher verwendet, um plausible Parameterbereiche für die in Abbildung 2b dargestellten 5 Abflussbildungsmodule festzulegen. Optimierungsverfahren wurden angewendet, um die Parameterbereiche weiter einzugrenzen.

3.2 Die künstliche Beregnung von Hängen zur Untersuchung der Abflussprozesse

In einem Forschungsprojekt (NFP 31 "Klimaänderungen und Naturkatastrophen") wurden auf 60 m² grossen Hangflächen künstliche Niederschläge zwischen 50 bis 100 mm/h appliziert. Abbildung 5 zeigt als Beispiel vier Hänge mit den beobachteten dominanten Abflussprozessen und den bei den Beregnungsversuchen gemessenen Oberflächenabflüssen und Abflüssen im Boden (Naef et al., 1998).

a) SOF1: Willerzell-Mulde

Auf dem feuchten Muldenstandort dringt nur wenig des künstlichen Starkregens in den Buntgley-Boden ein (geringe Infiltration). Der Grossteil des Niederschlags fliesst sofort als gesättigter Oberflächenabfluss (Saturation Overland Flow, SOF1) ab, ein kleiner Teil fliesst im Boden in Makroporen (Grobporen) ab. Aufgrund der starken Abflussreaktion ist das Wasserrückhaltevermögen (Retention) dieses Standorts sehr gering. Bei starken Gewitterregen trägt dieser Standort schnell und stark zum Abfluss bei.

b) SSF2: Willerzell-Hang

Am steilen Standort infiltriert das Wasser entlang von Grobporen (Bodenrissen, Regenwurmröhren) in den flachgründigen Braunerde-Boden und sickert bis auf die Felsoberfläche. In hoch durchlässigen Schichten über der Felsoberfläche fliesst das Wasser als Subsurface Flow (SSF) rasch ab. So entsteht mit leichter Verzögerung Abfluss im Boden, später wenig Oberflächenabfluss. Der Standort reagiert leicht verzögert auf Starkniederschläge und hat eine mässige Retention.

c) SOF3: Therwil

Die hohe Durchlässigkeit des tiefgründigen Braunerde-Bodens mit zahlreichen Grobporen bewirkt, dass viel Wasser infiltriert und während einer Stunde kein Abfluss entsteht. Ein Teil des Wassers sickert in den durchlässigen Sandsteinuntergrund. Stark verzögert fliesst ein Teil des Niederschlags oberflächlich ab (SOF3). Dieser Standort hat eine grosse Retention und trägt bei Starkregen nur verzögert zur Bildung von Hochwasser bei.

d) DP: Blauen

Die Durchlässigkeit dieses Rendzina-Bodens ist aufgrund von Grobporen übermässig, so dass über Stunden sämtliches Wasser infiltriert und weiter in den durchlässigen Kalkstein sickert. Solche Flächen tragen nur dann zu Hochwasser bei, wenn das perkolierte Wasser in den geologischen Schichten schnell abfliessen kann.

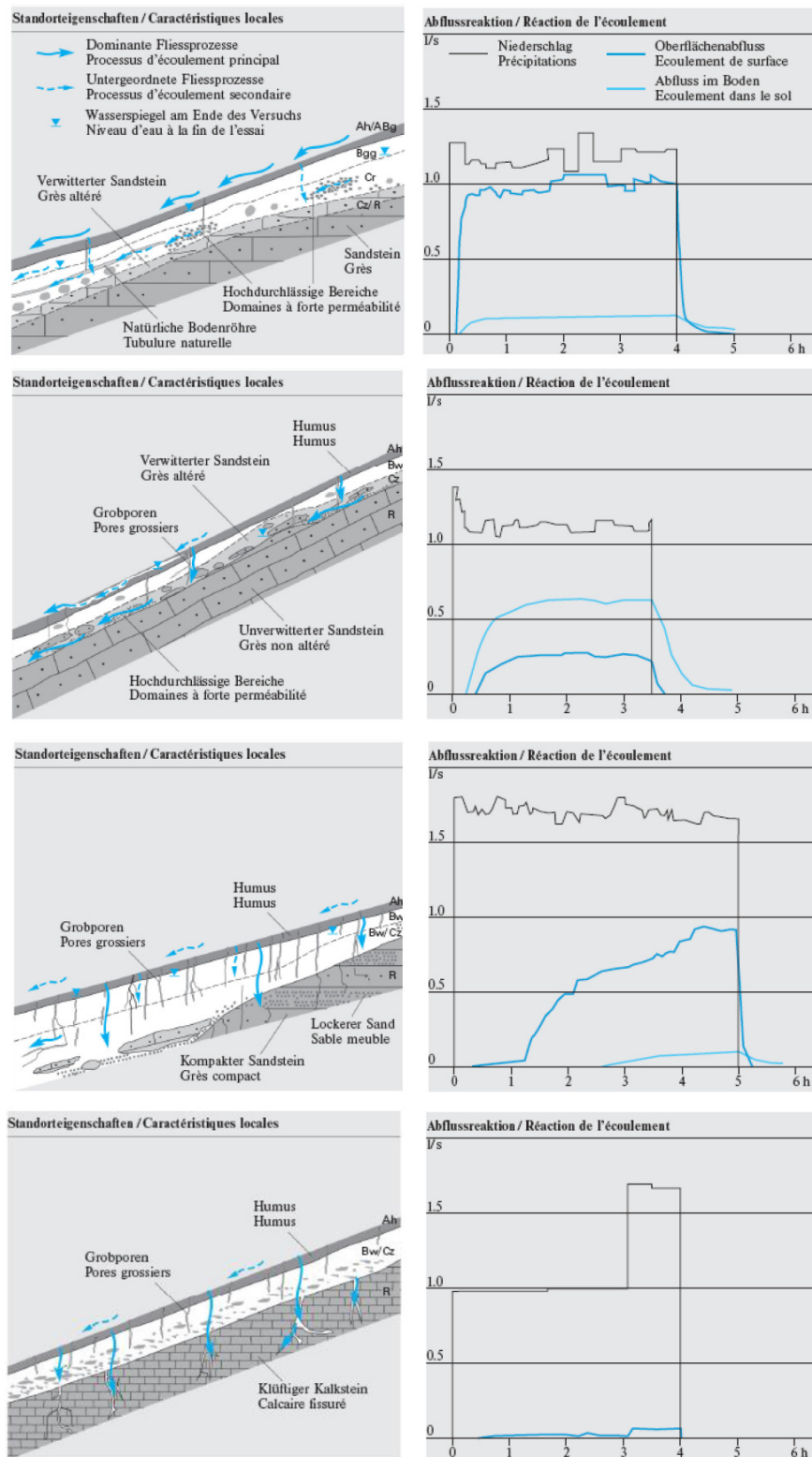


Abb. 5: Fallbeispiele zu den Beregnungsversuchen (Naef et al., 1999). Die schematisierten Hänge (links) zeigen die dominanten Abflussprozesse, die während Beregnungsversuchen beobachtet resp. identifiziert wurden. Rechts sind die beobachteten Abflussreaktionen dargestellt, aufgeteilt in Oberflächenabfluss und in Abfluss im Boden. Zuerst Willerzell-Mulde (Kt. SZ), dann Willerzell-Hang (Kt. SZ), dann Therwil (Kt. BL) und zuunterst Blauen (Kt. BL).

Scherrer AG (2006) entwickelte einen Kartierschlüssel zur Identifikation der hochwasserrelevanten Flächen im Gelände. Mit diesem Bestimmungsschlüssel kann anhand des Bodenprofils an einem Standort im Gelände der dominante Abflussprozess hergeleitet werden. Die an vielen Standorten gewonnenen Prozessinformationen werden dann in einem weiteren Schritt auf die Fläche übertragen.

Die Prozesse, welche einen ähnlich starken Beitrag zur Entstehung von Hochwasser leisten, werden zu sog. Abflusstypen zusammengefasst. Diese dienen als Grundlage für die Abflussberechnungen mit dem prozessnahen Abflussbildungsmodul.

3.3 Abflussreaktionskurven

Auf der Grundlage von Beregnungsversuchen (Scherrer, 1997) wurden die Flächen mit ähnlicher Abflussbereitschaft in fünf Abflusstypen zusammengefasst und je einer Abflussreaktionskurve zugeordnet (Abb. 6). Die Kurven beschreiben den Anteil des abfließenden Niederschlags in Abhängigkeit der Niederschlagsmenge. Eingetragen sind die Spitzen- und die Volumenabflusskoeffizienten. Letztere zeigen, dass vom Abflusstyp 3 bei einem Niederschlag von 100 mm rund 30 %, beim Abflusstyp 4 10 % abfließt. Beim am stärksten reagierenden Abflusstyp 1 fließt bei 100 mm Niederschlag über 70 % ab. Die Abflussreaktionskurven wurden aus den Beregnungsversuchen abgeleitet. Es sind beobachtete Ergebnisse, die idealisiert, bzw. geglättet wurden.

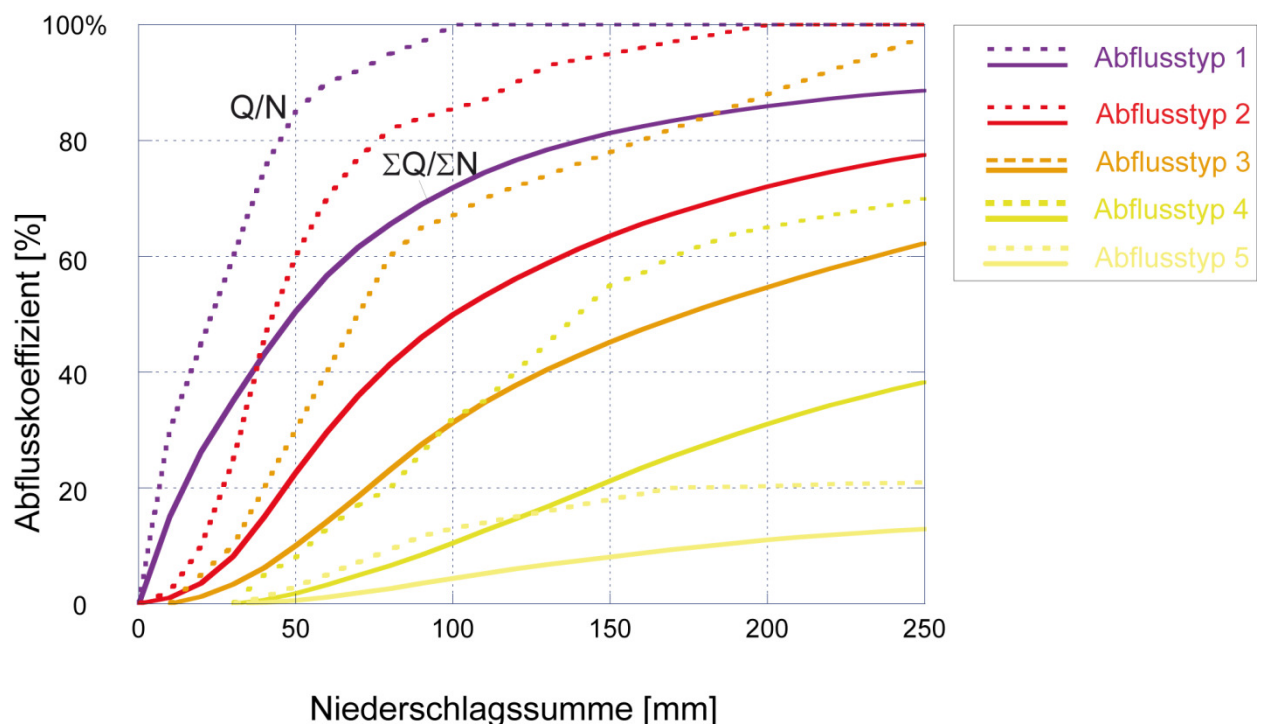


Abb. 6: Die Abflussreaktionskurven definieren den Anteil des abfließenden Niederschlags in Abhängigkeit der Niederschlagssumme. Eingetragen ist der Spitzenabflusskoeffizient (Q/N , gestrichelt) und der Volumenabflusskoeffizient ($\Sigma Q/\Sigma N$, ausgezogene Linie).

3.4 Festlegung der Parameterbereiche

Auf der Grundlage der oben beschriebenen Beregnungsversuche und bodenphysikalischer Kennwerte wurde für jeden der a priori festlegbaren Parameter plausible Parameterbereiche festgelegt. Im Einzelnen sind das: Der Parameter für den Grenzwert des Speichers, welcher Hortonischer Oberflächenabfluss aktiviert (SGRLUZ), die Speicherkonstanten für den schnellen Oberflächenabfluss und den verzögerten unterirdischen Abfluss (K0H, K1H) sowie die Perkolation in den Grundwasserspeicher (CPERC). Diese Parameterbereiche dienen als Grundlage für die verschiedenen, in Kapitel 3.5 beschriebenen Strategien zur Parametrisierung des prozessbasierten Abflussbildungsmoduls.

3.4.1 Bodenfeuchte- bzw. Abflussspeicher und Abflussspeichergrenzwert

Mit Hilfe von Infiltrations- und Beregnungsversuchen wurde die Bodenspeicherkapazität experimentell an zahlreichen Standorten mit unterschiedlichsten Bodentypen bestimmt (Scherrer, 1997; Schmocker-Fackel, 2005; Kienzler, 2007). Die bei einem Hochwasser verfügbare Wasserspeicherkapazität der untersuchten Bodenprofile lag zwischen 8 und 240 mm. Auf der Grundlage der experimentellen Beobachtungen und bodenphysikalischer Gesetzmässigkeiten konnte jedem Abflusstyp ein bestimmtes Speichervermögen zugeordnet werden (Schmocker-Fackel 2005, Naef et al. 2007). Tabelle 2 listet die Werte des Speichervermögens im Einzelnen auf:

Böden mit einer Speicherkapazität von bis zu 40 mm weisen ein geringes Speichervolumen auf und verursachen eine rasche und starke Abflussreaktion (Abflusstyp 1). Böden mit einer Speicherkapazität von 40 mm bis zu 100 mm besitzen ein mittleres Speichervolumen und verursachen eine leicht verzögerte bis verzögerte Abflussreaktion (Abflusstypen 2 und 3). Böden mit einer grossen (100 – 200 mm) oder gar extremen Speicherkapazität (> 200 mm) haben eine stark bis sehr stark verzögerte Abflussreaktion und werden den Abflusstypen 4 bzw. 5 zugewiesen (Schmocker-Fackel, 2005). Die Abflussbereitschaft einer Fläche hängt allerdings nicht nur von der Speicherkapazität, sondern auch vom dominanten Abflussprozess ab. Flächen, die unterirdisch lateral entwässern, tragen gegenüber Sättigungsflächen verzögert zum Hochwasser bei. Flächen gleicher Prozessintensität (z.B. SOF2, SSF2) können also dieselbe Speicherkapazität aufweisen, aber unterschiedlich rasch zum Hochwasser beitragen. Zusätzlich spielt auch die Durchlässigkeit des Untergrunds eine grosse Rolle. So können Flächen mit sehr stark verzögerter Abflussreaktion (Abflusstyp 5) durch grossen Bodenspeicher und oder durch grosse Durchlässigkeit des geologischen Untergrunds bedingt sein.

Tab. 2: Speichervermögen der Böden und Zuordnung zu den verschiedenen Abflusstypen und Abflussprozessen.

Speichervermögen [mm]	Abflussprozesse	Abflusstyp
0 – 40	SOF1, D1, HOF	1
40 – 100	SOF2, D2, SSF1	2
	SSF2	3
100 – 200	SOF3, SSF3, D3	4
> 200	DP	5

3.4.2 Speicherkonstanten für den oberirdischen und unterirdischen Abfluss

Durch Auswertung der Auslaufkurven bei den Beregnungsversuchen (Scherrer 1997, Kienzler 2007) konnten jeweils experimentell beobachtete Speicherkonstanten des Oberflächenabflusses sowie des unterirdischen Zwischenabflusses (subsurface flow) bestimmt werden. Es ergaben sich folgende K-Werte:

- Oberflächenabfluss: 0.05 – 0.4 h

- Abfluss im Boden SSF: für SSF1: 0.5 h, für SSF2 und SSF3: 2 – 4 h

3.4.3 Perkolation in den Grundwasserspeicher

Die Durchlässigkeit des geologischen Untergrundes entscheidet darüber, wieviel Wasser während eines Niederschlagsereignisses in den Untergrund unterhalb der Bodenzone versickern kann. Bei durchlässigen Gesteinen kann viel Wasser versickern und gespeichert werden, ohne dass Abfluss entsteht. Der dominante Abflussprozess ist dann Tiefensickerung bzw. Deep Percolation und die Abflussreaktion ist sehr stark verzögert (Abflusstyp 5). Undurchlässiges Gestein hingegen wirkt stauend, so dass SOF oder SSF entsteht. Die Abflussbildung hängt dann v.a. von der Speicherkapazität des Bodens ab. Aus der Auswertung der Beregnungsversuche (Scherrer 1997, Kienzler 2007) konnten experimentell Tiefensickerungsraten während der Beregnung bestimmt werden. Dabei wurden sehr unterschiedliche Werte beobachtet, von nahe 0 bis zu über 90 mm/h. Bei der Kartierung der Abflussprozesse können den verschiedenen Gesteinsformationen keine exakten Durchlässigkeiten zugeordnet werden, weil die geologische Karte die Formationen zu wenig detailliert wiedergibt und die Durchlässigkeit auch innerhalb einer geologischen Formation variieren kann (z.B. Klüfte, örtliche Verwitterung, Wechsellagerung unterschiedlich durchlässiger Gesteinsschichten, etc.). Doch lässt sich anhand von Erfahrungswerten festlegen, welche Gesteine durchlässig (z.B. Bachschuttkegel, verkarstete Gesteine), mässig bzw. uneinheitlich durchlässig (z.B. Moränen, Rutschungen) und welche undurchlässig (z.B. Seelehme, Tongesteine) sind.

3.4.4 Abflusskonzentration und Wellenverformung

Die Konzentration des oberirdischen Abflusses bis zum Gewässernetz erfolgt mit Hilfe der mit dem TANALYS Tool (Schulla, 1999) berechneten Fliesszeiten (vgl. Abb. 7). Für jedes Teilgebiet wird die durchschnittliche Fliesszeit berechnet. Falls diese grösser ist als die zeitliche Auflösung vom Modell (1 Stunde), wird sie bei der Berechnung vom totalen Abfluss entsprechend berücksichtigt. Der gleiche Ansatz wird für das Routing im Gewässernetz verwendet. Die zeitliche Verzögerung des unterirdischen Abflusses erfolgt hingegen mit einem Speicheransatz, da die Fliesszeiten im Boden nicht nur von der Topographie abhängig sind und folglich nicht mit dem TANALYS Tool kalkulierbar sind. Für die Speicherkonstante dieses Gebietsspeichers (GS1H) wurde ein Bereich zwischen 1 und 3 Stunden festgesetzt.

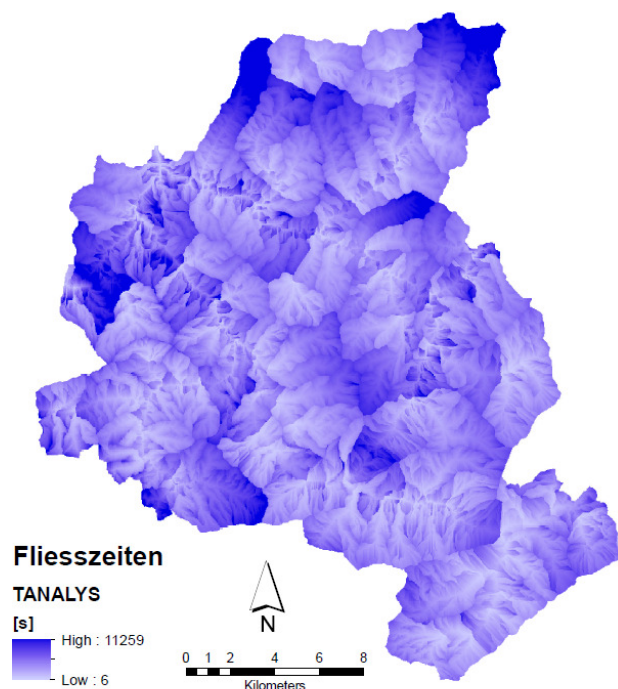


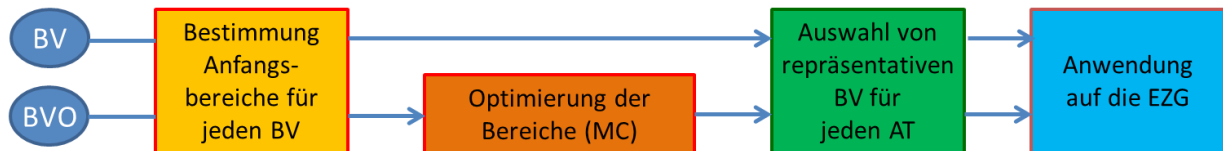
Abb. 7: Mit dem TANALYS-Tool (Schulla, 1999) berechnete Fliesszeiten bis zum jeweiligen Teil-EZG-Auslass.

3.5 Parametrisierungsstrategien

Vier verschiedene Strategien wurden für die Parametrisierung des prozessbasierten Modells angewendet (vgl. Abb. 8):

1. Auf Berechnungsversuche basierte Parametrisierung (BV)
2. Auf Berechnungsversuche basierte und optimierte Parametrisierung (BVO)
3. Auf Abflusstypen basierte Parametrisierung (AT)
4. Auf Abflusstypen basierte und optimierte Parametrisierung (ATO)

BV-basierte Parametrisierungen



AT-basierte Parametrisierungen

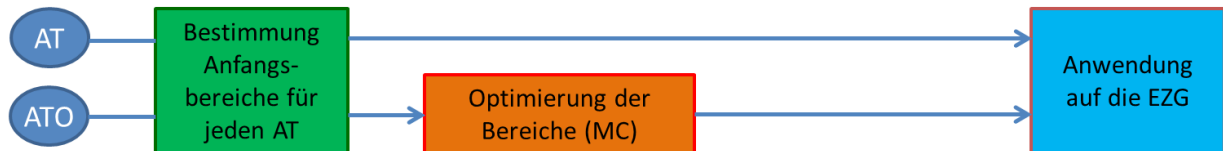


Abb. 8: Schematische Darstellung der vier unterschiedlichen angewandten Strategien zur Parametrisierung des Modells. BV = Berechnungsversuch; AT = Abflusstyp; MC = Montecarlo-Simulation; EZG = Einzugsgebiete; BVO = nach BV optimiert; ATO = Nach AT optimiert.

Bei den Parametrisierungen, die auf die Berechnungsversuche (BV) zurückgreifen, werden zuerst die Parameter-Anfangsbereiche gemäss der in Kapitel 3.4 festgelegten plausiblen Parameterbereichen definiert.

Anschliessend werden für jeden Abflusstyp einer oder mehrere Berechnungsversuche ausgewählt, die eine Abflussbereitschaft aufweisen, die repräsentativ für den jeweiligen Abflusstyp ist. Abbildung 9 zeigt wie der Berechnungsversuch in Willerzell (Mulde, BV43) repräsentativ für Abflusstyp 1 (AT 1) ist, so wie die Berechnungsversuche in Bilten (BV5) bzw. Therwil (BV50) ein charakteristisches Verhalten für AT2 bzw. AT3 aufweisen. Letztendlich werden die ausgewählten Parameterbereiche auf die in Kapitel 4.1 beschriebenen EZG übernommen.

Eine zweite Strategie (BVO in Abb. 8) berücksichtigt eine Optimierung der Anfangsbereiche mittels Montecarlo-Simulation, bei der nur die besten 100 Läufe für die Verringerung der Parameterbereiche in Betracht gezogen werden. Abbildung 10 zeigt den für den Berechnungsversuch 5 (Bilten) optimierten Parameterbereich. Diese Optimierung soll der Entfernung unwirksamer Parameterkombinationen dienen, stellt aber die Gefahr dar, dass das Modell mit all zu zuversichtlichen Parameterwerten betrieben wird („**overconfidence**“).

Die anderen zwei angewandten Strategien greifen auf die Abflusstypen (AT) zurück. Die Anfangsbereiche werden in diesen Fall auf der Grundlage von den in Abbildung 6 dargestellten Kurven bestimmt. Somit ist aber die erfolgreiche Nachrechnung der einzelnen Berechnungsversuche nicht mehr gewährleistet, da mit diesem Verfahren die Unterscheidung zwischen ober- und unterirdischem Abfluss nicht mehr möglich ist, da die Abflussreaktionskurven sich auf den gesamten Abfluss beziehen. In Anlehnung an die auf Berechnungsversuchen basierten Parametrisierungen, unterscheiden sich die zwei auf Abflusstypen basierenden Parametrisierungen voneinander (siehe Abb. 9), indem im einen Fall (ATO) die Anfangsbereiche mit einer Montecarlo Simulation verringert werden. Die Parameterbereiche jeder

Parametrisierung sowie die mit der BVO-Strategie nachgerechneten Beregnungsversuchen und die mit der ATO-Strategie simulierten Abflussreaktionskurven sind im Anhang A bzw. B zu finden.

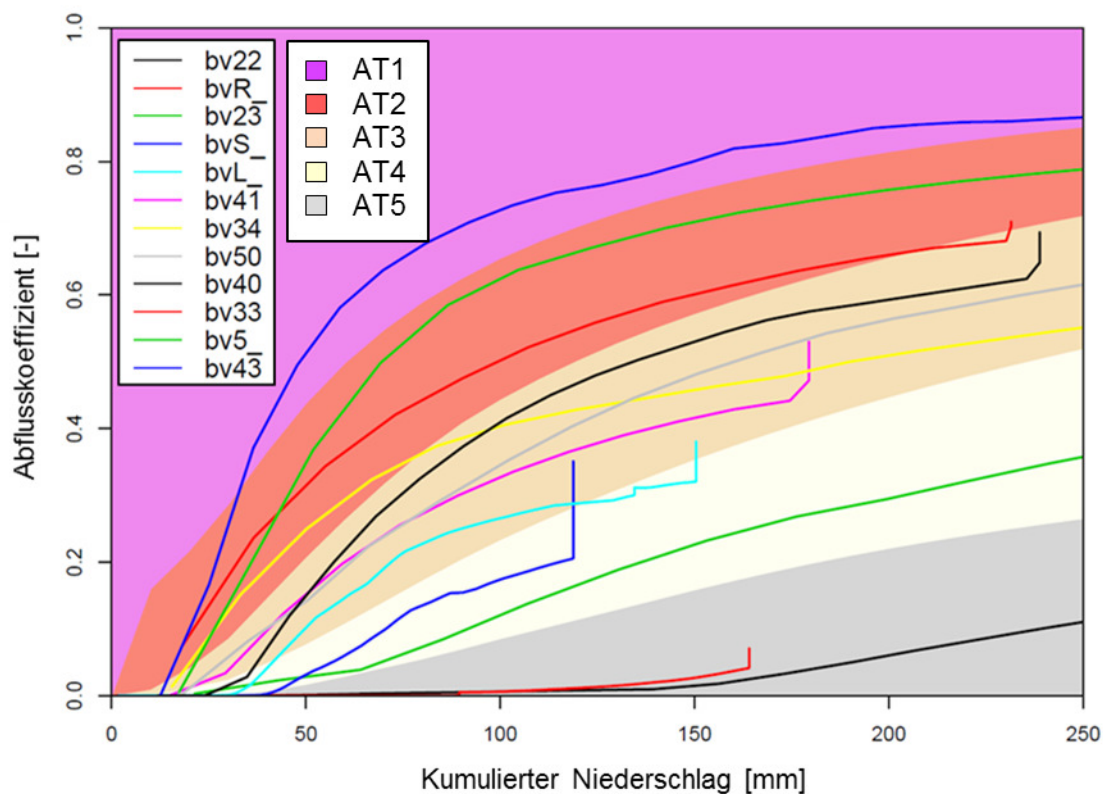


Abb. 9: Abflussreaktionskurven der verschiedenen Beregnungsversuche (ausgezogenen Linien). Die Farben im Hintergrund stellen die entsprechende Bereiche der in Abb. 5 dargestellten Abflusstypen dar. Informationen über die einzelnen Beregnungsversuche sind in Anhang A zu finden.

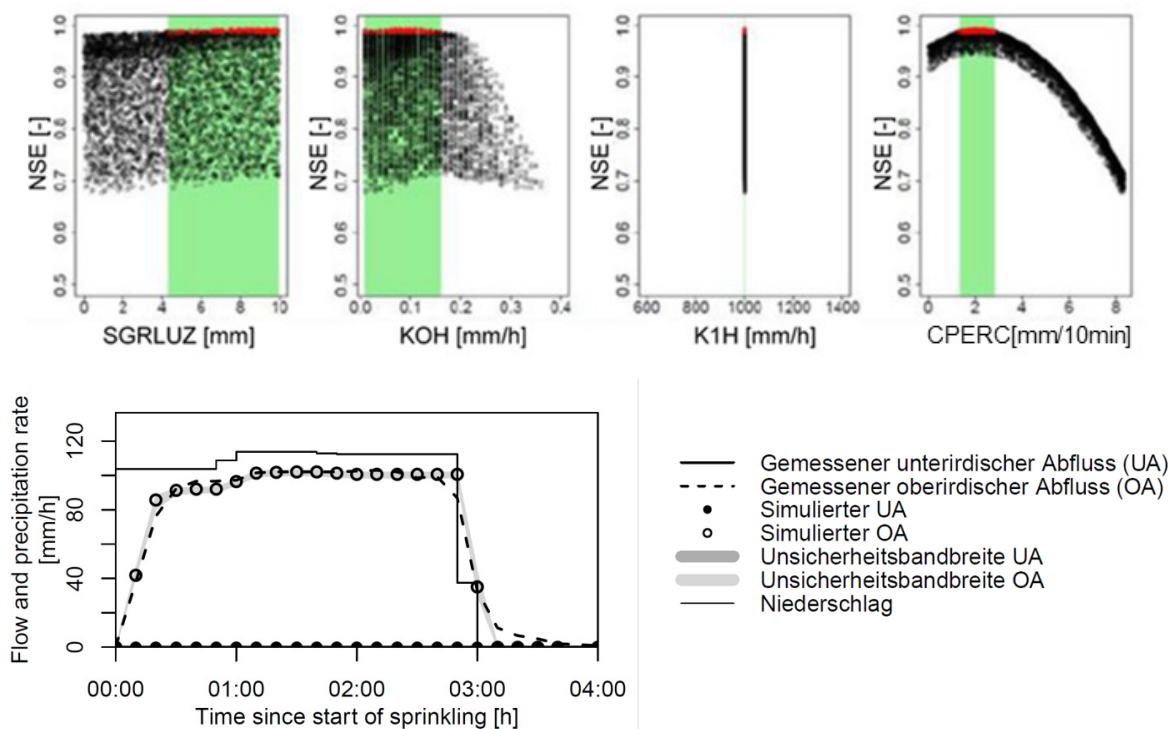


Abb. 10: Optimierte Parameterbereiche und simulierte Ganglinien gemäss BVO-Strategie für den BV5 (Bilten).

3.6 Übertragung der a-priori festgelegten Parameterbereiche auf EZG

Die 4 verschiedenen Parametrisierungsstrategien wurden im EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen Teil-EZG verifiziert (für eine ausführliche Beschreibung dieser Gebiete wird auf Kapitel 4.2.2 verwiesen). Abbildung 11 stellt die Simulationsergebnisse der Ereignisse vom 30. August bis 1. September 2014 dar (weitere simulierte Ereignisse sind in Anhang C zu finden). In dieser Zeitspanne traten zwei kleine Hochwasser auf.

Die **BV-basierten Parametrisierungen** ergeben eine starke Unterschätzung der Abflussspitzen in allen EZG mit der Ausnahme vom EZG der Trueb. Das Mass der Unterschätzung ist überraschend und die Frage stellt sich, weshalb die Unterschätzung so ausgeprägt ist.

Bei den Beregnungsversuchen wurden Hangflächen mit künstlichen Starkregen konstanter Intensität von ca. 20 bis 100 mm/h appliziert. Diese Mengen und Intensitäten sind dabei um ein Mehrfaches höher als die der auslösenden Niederschläge kleinerer und mittlerer Hochwasser und auch noch wesentlich höher als die Niederschläge des simulierten Hochwassers 2005.

In durchlässigen Böden ist die Infiltration hoch, weil sowohl die Bodenmatrix als auch präferentielle Fliesswege für den Wasserfluss in den Boden genützt werden. Je nach Mächtigkeit des Bodens können so in kurzer Zeit grosse Teile des Bodenprofils erreicht werden und für die Speicherung nutzbar gemacht werden. Geht der Boden unten in eine durchlässige Schicht über, wird die Tiefensickerung aktiviert.

Bei kleineren Niederschlagsmengen wie sie bei den simulierten Ereignissen auf EZG-Ebene beobachtet wurden, dürfte das Wasser meist im Oberboden und in Teilen des Unterbodens gespeichert werden, ohne dass Tiefensickerung einsetzt. Die bei den Beregnungsversuchen beobachteten Perkulationsraten beim Nassboden in Biltlen (BV5, Abb. 8), wo Hortonischer Oberflächenabfluss auftrat, liegen bei 2 mm/h. Bei anderen Standorten waren sie noch wesentlich höher. Die Übernahme dieser Versickerungsraten direkt ins Modell führt dazu, dass im Modell bei wenig intensiven Niederschlägen fast sämtlicher Niederschlag durch die Perkulationsraten aufgezehrt wird. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Simulationen mit BV-basierten Parametern die Abflussvolumen und -spitzen derart unterschätzt. Da es sich bei der Übertragung von BV auf ganze Gebiete einerseits um ein hydrologisches Skalenproblem handelt, andererseits um ganz andere Grössenordnungen des Niederschlags (Intensität, Menge) vorliegen, müssten die Perkulationsraten abgemindert werden, um solidere Ergebnisse zu erreichen.

Die **AT-basierte Parametrisierung** ist hingegen in der Lage, die Ganglinie der Emme bis Emmenmatt und der Ilfis besser nachzubilden, während die Abflussspitzen in Eggwil unterschätzt und in Trubschachen überschätzt werden. In Abbildung 11 ist zudem zu erkennen, wie die optimierte Variante der Parametrisierungsstrategien generell zu einer besseren Leistung und zu kleineren Unsicherheiten führt. Der Vergleich zwischen dem prozessnahen und dem traditionellen PREVAH wird deswegen mit der optimierten, AT-basierten Parametrisierung (ATO) durchgeführt.

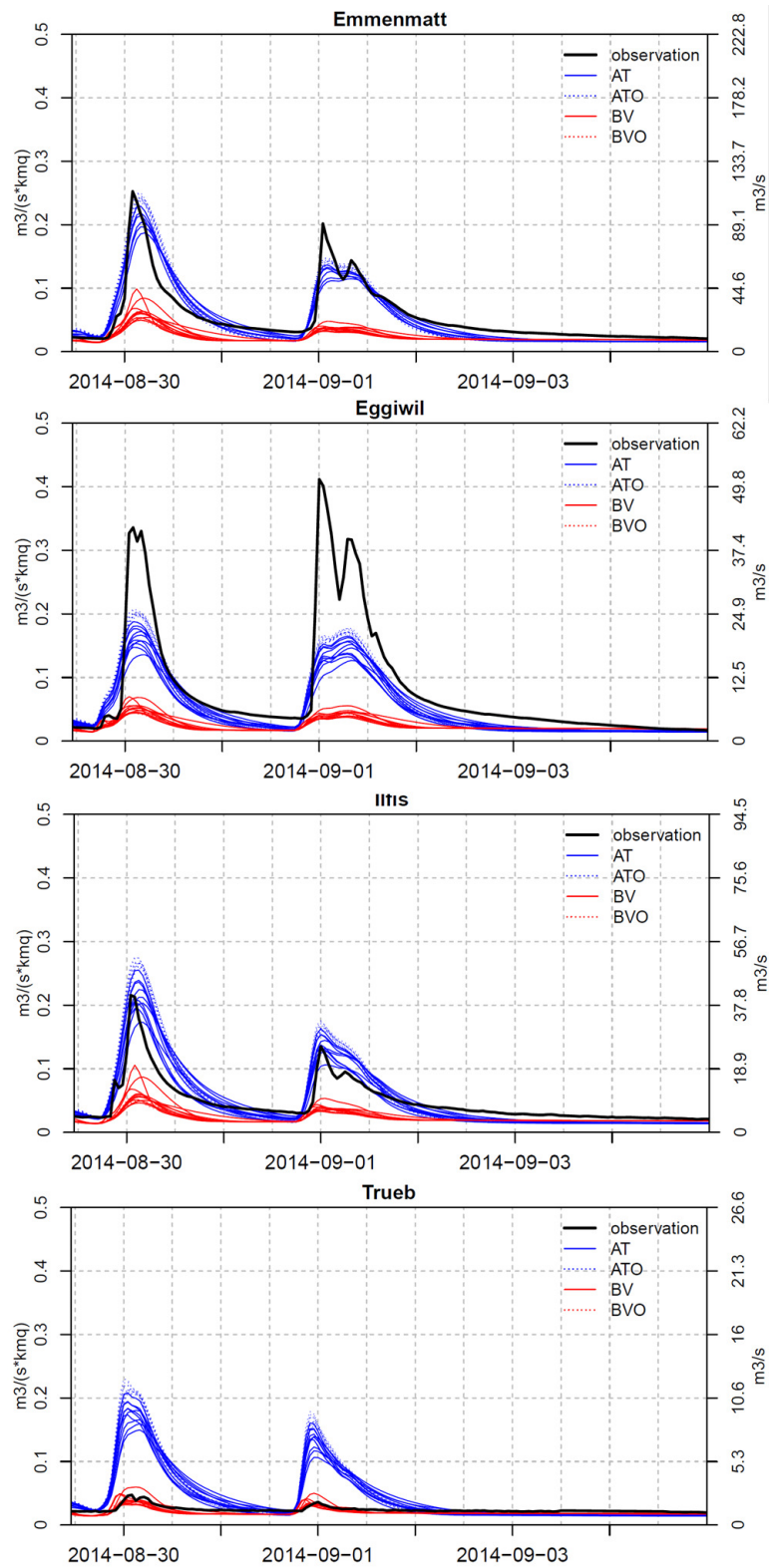


Abb. 11: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und mit den AT-basierten (blau) bzw. BV-basierte (rot) Parametrisierung simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Gebiete. Kontinuierliche (strichlierte) Linien beziehen sich auf die Varianten ohne (mit) Optimierung.

4 Fallstudien

4.1 Einleitung

Mit verschiedenen Fallstudien soll das Leistungsvermögen des DRP-PREVAH mit a priori-festgelegten Parametern und mit Abflusstypenkarten in verschiedenen grossen Gebieten mit unterschiedlicher Datenverfügbarkeit untersucht werden. Zuerst wird das Modell in kleinen EZG von ca. 2 km² Fläche (Ror und Isert, Kt. ZH) mit nahegelegenen Niederschlagsstationen getestet (1. Fallstudie). Dann wird das Modell in grösseren EZG mit 4.6 bis 22 km² Fläche (Dorfbach Meilen und Reppisch Kt. ZH) mit schweizweit verfügbaren CombiPrecip-Daten (2. Fallstudie) getestet und am Schluss in einem grossen EZG von 443 km² (Emme, Kt. BE, 3. Fallstudie) ebenfalls mit Inputdaten von CombiPrecip.

Informationen über die räumliche Verteilung der Abflussbildungsprozesse stammen für die Gebiete Ror und Isert aus Schmocker-Fackel (2004) und für die Reppisch und den Dorfbach Meilen aus den manuell hergeleiteten Prozesskarten der Scherrer AG. Für das Gebiet der Emme bis Emmenmatt und für den Sperbel- und Rappengraben wurden die automatisch hergeleiteten Karten des Büros SoilCom GmbH verwendet.

4.2 Fallstudie 1: Klein-Einzugsgebiete bis ca. 2 km² mit guten Niederschlag- und Abflussdaten (aber kurzer Messperiode)

Die erste Fallstudie entspricht dem idealen Fall, in welchem man über sehr genaue und geprüfte Niederschlags- und Abflussdaten verfügt. Somit wird eine Quantifizierung des effektiven Mehrwerts aus der Berücksichtigung von den Abflussprozessen während der Modellierung angestrebt, ohne dass andere Unsicherheitsquellen einen grossen Einfluss auf den simulierten Abfluss haben können. Dafür wurden die EZG und Daten aus der Dissertation von Schmocker-Fackel (2004) verwendet.

4.2.1 Untersuchungsgebiete

In Abbildung 12 sind das Ror- (2.1 km²) und das Isert-EZG (1.7 km²) im EZG des Aabachs dargestellt. Die zwei Gebiete befinden sich ca. 30 km südöstlich von Zürich. Sie sind von der Oberen Süsswassermolasse geprägt (Hantke et al., 1967), die teilweise von Würmmoräne und fluvialen Ablagerungen überlagert sind. Die Landnutzung besteht vor allem aus Weide, während bewaldete Flächen und Siedlungen nur in geringerem Umfang zu finden sind. Vorliegende drainierte Flächen (ca. 20%) wurden während der Kartierung der Prozesse berücksichtigt. Trotz einer ähnlichen Grösse, Landnutzung und Topographie, weisen die zwei EZG eine unterschiedliche hydrologische Reaktion auf Starkniederschläge auf (vgl. Abb. 15): Während das Ror-EZG und das Teil-EZG der Lindist eine rasche bis sehr rasche Reaktion aufweisen, dominieren AT4- und AT5-Flächen im Isert-EZG, und die Abflussreaktion ist folglich stark bis sehr stark verzögert.

Auf diese EZG sowie auf das Teil-EZG der Lindist sind geprüfte Niederschlags- sowie Abflussdaten von verschiedenen Ereignissen vorhanden (vgl. Tab. 3).

Tab. 3. Beginn und Ende der simulierten Zeitspannen nach Schmocker-Fackel (2004) leicht verändert.

Lindist			Ror und Isert ¹		
Name	Simulationsbeginn	Simulationsende	Name	Simulationsbeginn	Simulationsende
Sep01	14.09.2001	23.09.2001	Mai99	12.05.1999	12.05.1999
Sep02	20.09.2002	28.09.2002			
Okt02	14.10.2002	22.10.2007			

¹ Isert N- und Q-Daten gemessen von EAWAG

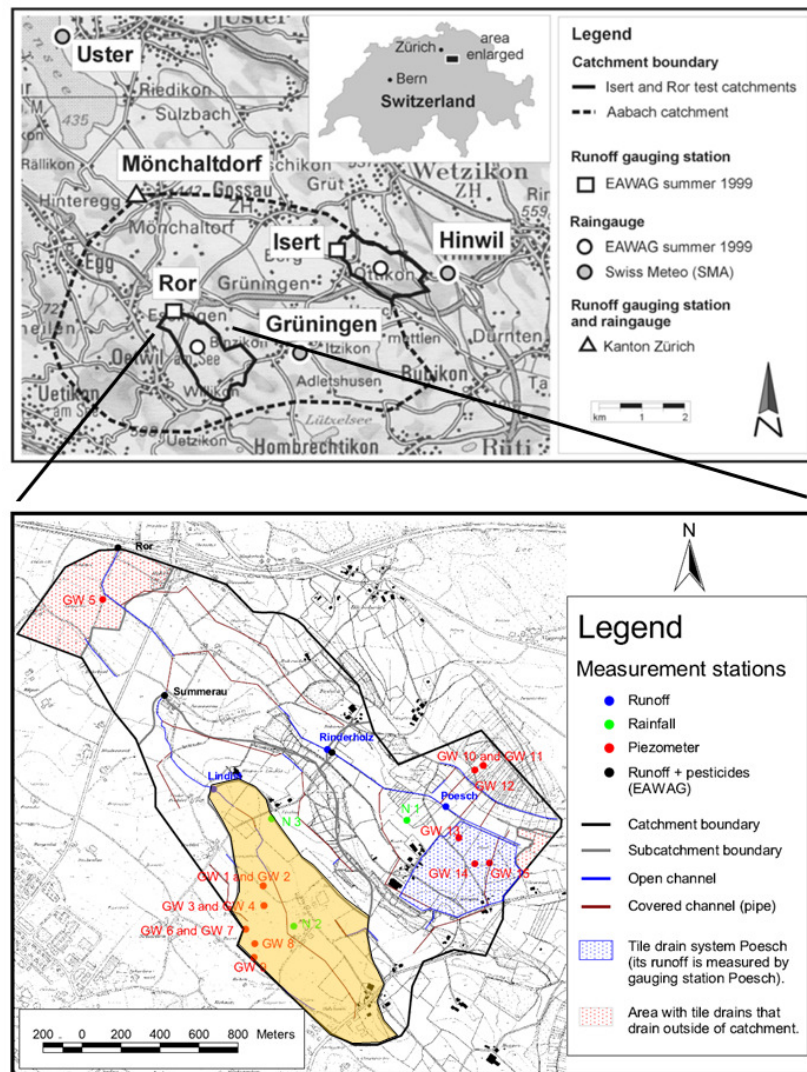


Abb. 12: (a) Übersicht über das Iser-EZG und das Ror-EZG und Lage der Niederschlagsstationen und der Pegel. (b) Detailansicht vom Ror-EZG, vom Teil-EZG der Lindist (gelb hervorgehoben) und Lage der Niederschlagsstationen und der Pegel. Abbildung leicht verändert nach Schmocker-Fackel (2004).

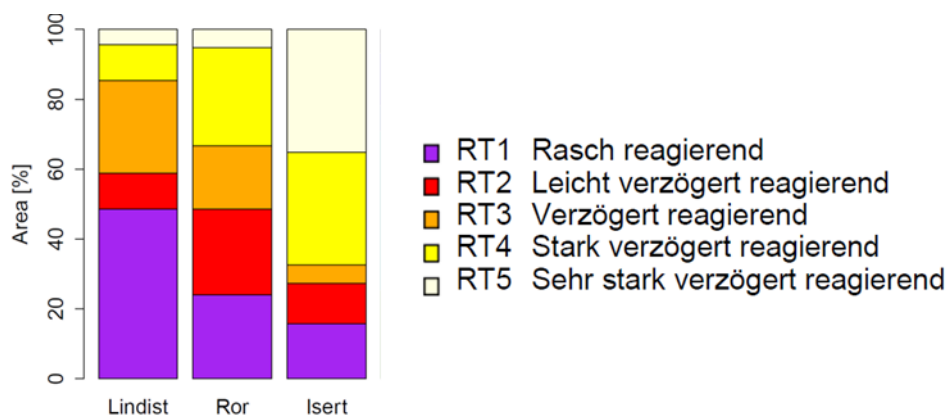


Abb. 13: Ausdehnung der AT-Flächen in den Untersuchungsgebieten der Fallstudie 1, leicht verändert nach Schmocker-Fackel (2004).

4.2.2 Verwendete Zielfunktionen

Zur Modellüberprüfung wurden verschiedene kurze Perioden nachgerechnet. An Stelle eines fixen Werts für jeden Parameter und Abflusstyp zu verwenden wurden zehn verschiedene Modellläufe pro

Ereignis ausgeführt, um die Parameterunsicherheit zu erfassen. Für jeden Lauf wurden die Parameterwerte deswegen stichprobenweise innerhalb der a-priori definierten Parameterbereiche gewählt. Die Verteilung der Werte innerhalb jedes Parameterbereichs wurde uniform angenommen.

Je nach Fragestellung kamen im Laufe der Untersuchung verschiedene Zielfunktionen zum Einsatz. Als Zielfunktion wurde der gebräuchliche Nash-Sutcliffe Effizienzkoeffizient (NSE, Nash und Sutcliffe, 1970) verwendet. Die NSE-Berechnung erfolgt nach der Gleichung

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs,i}})^2}$$

Zudem wurde der Kling-Gupta Effizienzkoeffizient (Gupta et al., 2009) verwendet, der eine Weiterentwicklung des gebräuchlichen Nash-Sutcliffe Koeffizienten (NSE, Nash und Sutcliffe, 1970) darstellt. Der Vorteil dieses Güteparameters im Vergleich zum NSE liegt darin, dass neben den Abflussspitzen auch das simulierte Abflussvolumen in Betracht gezogen werden. Die KGE-Berechnung erfolgt nach der Gleichung

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2}$$

wobei r die Korrelation zwischen simulierten und gemessenen Abfluss entspricht. α ist das Verhältnis zwischen den Standardabweichungen der simulierten und gemessenen Abflüsse, während β das Verhältnis zwischen der durchschnittlichen simulierten und gemessenen Abflüsse darstellt.

Zudem wurde der Series Distance-Ansatz (Ehret und Zehe, 2011) verwendet, der eine Unterscheidung zwischen zeitlicher und volumetrischer Abweichung der simulierten Ganglinien ermöglicht. Dieser Ansatz ermöglicht eine Beurteilung der Simulationen ähnlich einer visuellen Inspektion, da Punkte mit gleicher hydrologischer Bedeutung (z.B. Ereignisanfang, -spitze, -ende), verglichen werden. Abbildung 14 zeigt, wie dieser Ansatz umgesetzt wird.

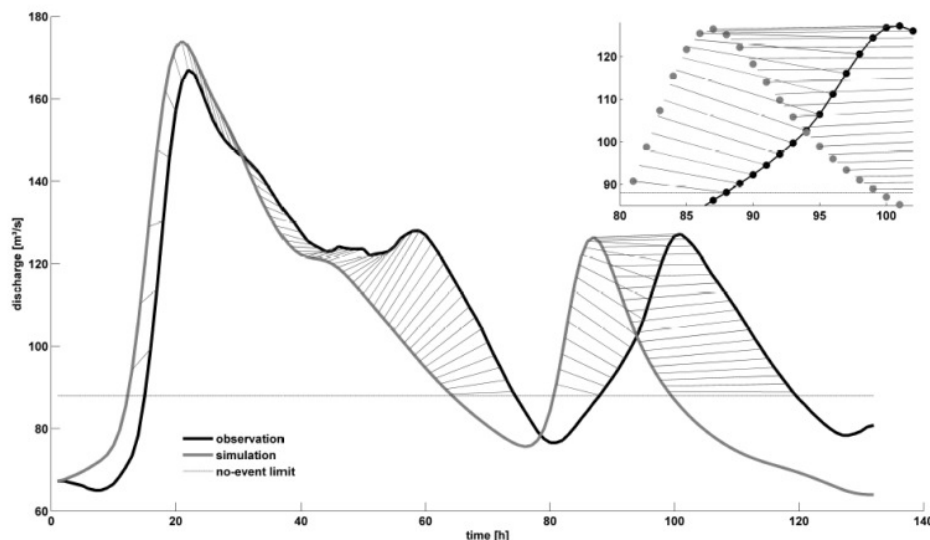


Abb. 14: Series-Distance-Ansatz (Ehret & Zehe, 2011).

4.2.3 Vergleich zwischen dem prozessnahen Abflussbildungsmodul und dem traditionellen PREVAH

In diesem Kapitel wird die prozessnahe (DRP-PREVAH) mit der traditionellen Version von PREVAH verglichen. Das traditionelle Modell wird mit drei verschiedenen Konfigurationen getestet: In der ersten Variante wird das traditionelle Modell als nicht kalibriert betrachtet, indem die Resultate aus einer Monte Carlo Simulation mit 2000 Läufen für jedes Gebiet dargestellt werden. Die zweite Variante entspricht dem kalibrierten traditionellen PREVAH, und nur die zehn besten Parameterkombinationen aus der

oben erwähnten Montecarlo Simulation werden aufgezeigt. Die dritte Konfiguration entspricht einem Upscalingverfahren, indem die zehn besten Parameterkombinationen aus der Montecarlo Simulation auf dem kleinsten EZG ausgewählt und auf die anderen EZG übertragen werden.

Die Ergebnisse aus den Simulationen zeigen, dass das prozessnahe Modul in der Lage ist, die Abflussspitzen und das Abflussvolumen besser nachzubilden als das traditionelle PREVAH (Abb. 15). Die durchschnittliche Leistung des prozessnahen Moduls ist höher als diejenige des traditionellen PREVAH (Abb. 16). Der markante Leistungsunterschied zeigt sich v.a. in EZG mit grossen Unterschieden der Abflussreaktion. Dies zeigt sich eindrücklich im Isert-EZG, wo eine stark verzögerte Abflussreaktion erfolgt, die vom traditionellen PREVAH nicht abgebildet werden kann.

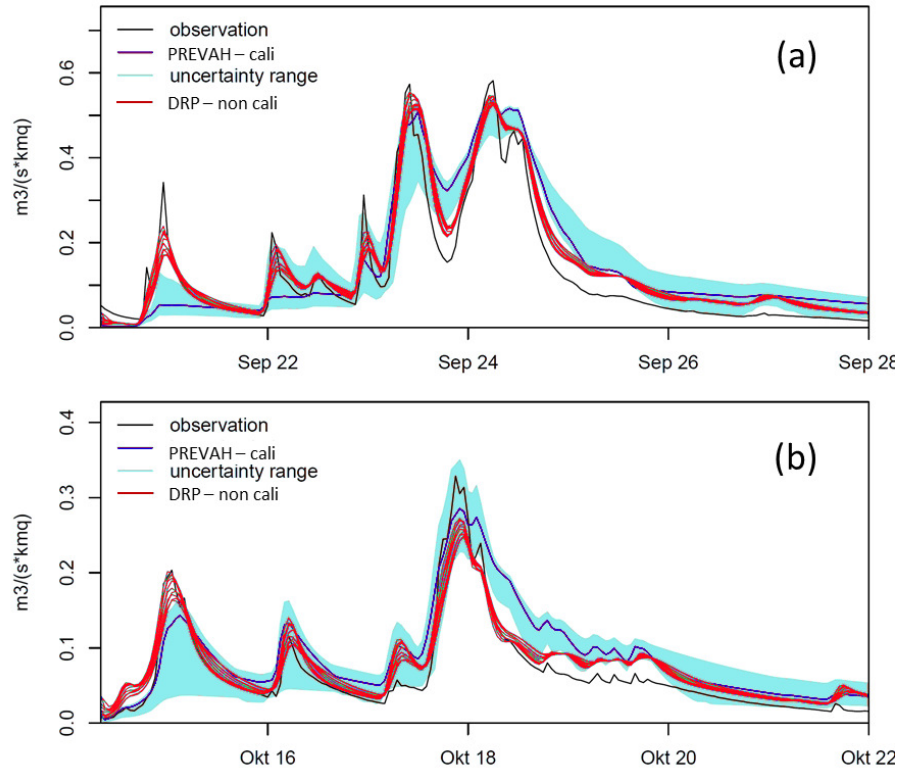


Abb. 15: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und simulierten Ganglinien für das Lindist-EZG während der Ereignisse zwischen dem 20. und 28. September 2002 (a) und zwischen dem 14. und 22. Oktober 2012 (b). Die blaue Ganglinie wurde mit dem traditionellen, kalibrierten PREVAH und die roten Ganglinien mit dem prozessbasierten Modell simuliert. Die Unsicherheits-Bandbreiten entsprechen Simulationen mit den besten 100 Läufen der Montecarlo Simulation des traditionellen PREVAH.

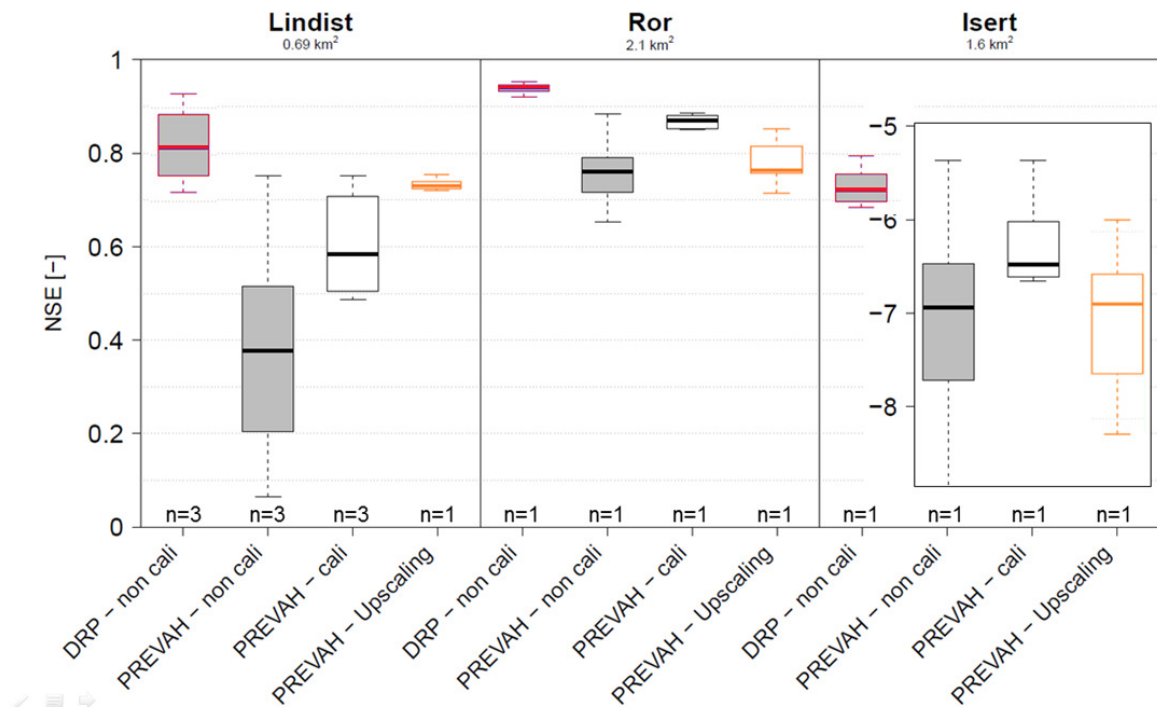


Abb. 16: Ergebnisse der Simulationen in den in Kapitel 4.2.1 beschriebenen EZG. Die Ergebnisse aus allen einzelnen Ereignissen sind in Anhang D aufgeführt. Eine graue Füllung der Boxplots entspricht Modellläufen ohne Kalibrierung, während eine weiße Füllung Läufe mit einer Kalibrierung entspricht. n entspricht der Anzahl der simulierten Ereignisse pro EZG.

4.3 Fallstudie 2: Mesoskalige Einzugsgebiete (4 resp. 22 km²) mit allgemein verfügbarem Niederschlagsinput (CombiPrecip)

Im Hinblick auf die geplante Anwendung des prozessnahen Modells wurden in der zweiten Fallstudie grössere EZG untersucht, wo für die Simulationen die räumlich verteilten Niederschlagsdaten der Meteoschweiz verwendet wurden (CombiPrecip-Daten; Sideris et al., 2014). Einerseits soll die Qualität der Modellierung untersucht werden, andererseits weisen die räumlich zwar gut aufgelösten Niederschlagsdaten von CombiPrecip eine höhere Unsicherheit auf als die Inputdaten der Fallstudie 1. Es wird untersucht ob die Verwendung der Prozesskarten auch dann noch von Vorteil ist, wenn die Inputdaten einen höheren Grad an Unsicherheit haben.

Da CombiPrecip-Daten ab 2005 verfügbar sind, wurden diejenige Ereignisse ausgewählt, die einen Spitzenabfluss grösser als $0.2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-2}$ aufwiesen. Dies ergab insgesamt 20 zu simulierende Ereignisse für die EZG in den Voralpen und 9 Ereignisse auf die EZG der Reppisch und Dorfbach Meilen (vgl. Tab. 4).

4.3.1 Untersuchungsgebiete Dorfbach (Meilen) und Reppisch (Birmensdorf) und deren Kartierung

Der Dorfbach entwässert in Meilen ein EZG von 4.6 km^2 und mündet direkt in den Zürichsee, weist einen beträchtlichen Höhenunterschied auf (450 m) und ist zu ca. zu einem Drittel bewaldet (Abb.16a, b). Das EZG des Dorfbachs Meilen ist von der Oberen Süsswassermolasse geprägt (Hantke et al., 1967; Zingg, 1934; Abbildung 16c). Es ist vor allem die Nagelfluh, welche den oberflächennahen Untergrund dominiert, lokal tritt Würmmoräne auf. Im EZG dominieren normal durchlässige, speicherfähige Braunerdeböden. Im EZG des Dorfbachs machen die Abflusstypen 1-3 (rasch, leicht verzögert und verzögert beitragende Flächen) einen Anteil von insgesamt 41.5% der EZG-Fläche aus, 58.5% der Fläche reagieren stark bis sehr stark verzögert auf Niederschläge (AT4 und AT5; Abb. 16d). Aufgrund dieser Flächenverteilung zeigt der Dorfbach eine mässige bis starke Reaktion auf Niederschläge.

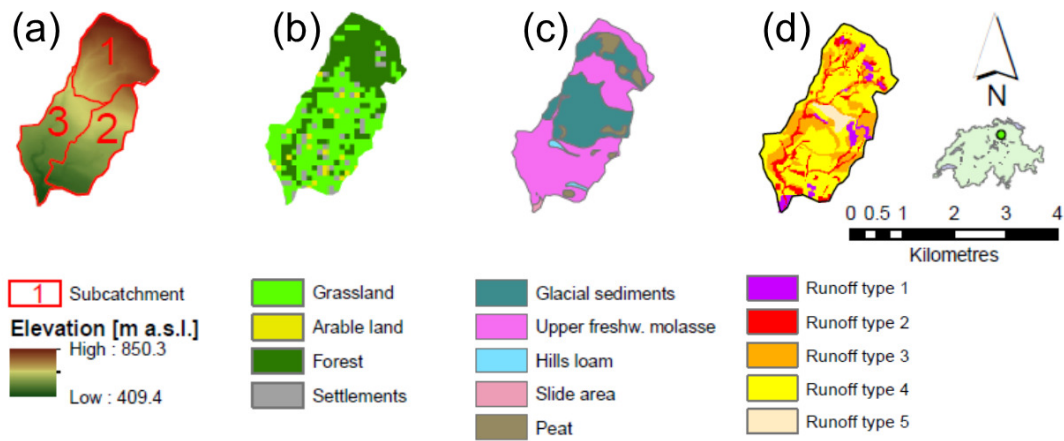


Abb. 16: Übersicht über das EZG des Dorfbachs Meilen und Flächen ähnlicher Abflussbereitschaft (Scherrer AG, 2006).

Das EZG der Reppisch bis Birmensdorf umfasst eine Fläche von 22 km² und das durchschnittliche Gefälle ist geringer als in Meilen (Abb. 17a). Davon sind 12% Siedlungs-, 48% Gras- und 38% Waldflächen (vgl. Abb. 17b). Die Reppisch hat sich tief in das von Gletschern geprägte Tal eingeschnitten und teilweise steile, heute meist bewaldete Flanken geschaffen. Der Unterbau des EZG bildet die aus Sandsteinen und Mergeln aufgebaute Obere Süsswassermolasse (Hantke et al. 1967; Abb. 17c). Im Grossteil des EZG liegen ausgedehnte Flächen mit normal durchlässigen und speicherfähigen Braunerdeböden. Von Stau-, Hang- oder von Grundwasser geprägte Böden mit mässiger Durchlässigkeit und mässigem Speichervermögen sind im Gebiet weniger stark verbreitet als in Meilen. Im EZG der Reppisch machen AT 1-3 58.7% aus. Die stark bis sehr stark verzögert reagierenden Flächen (AT4 und AT5) machen 41.3 % des EZG aus (Abb. 17d). Die Abflussreaktion ist also stärker als in Meilen.

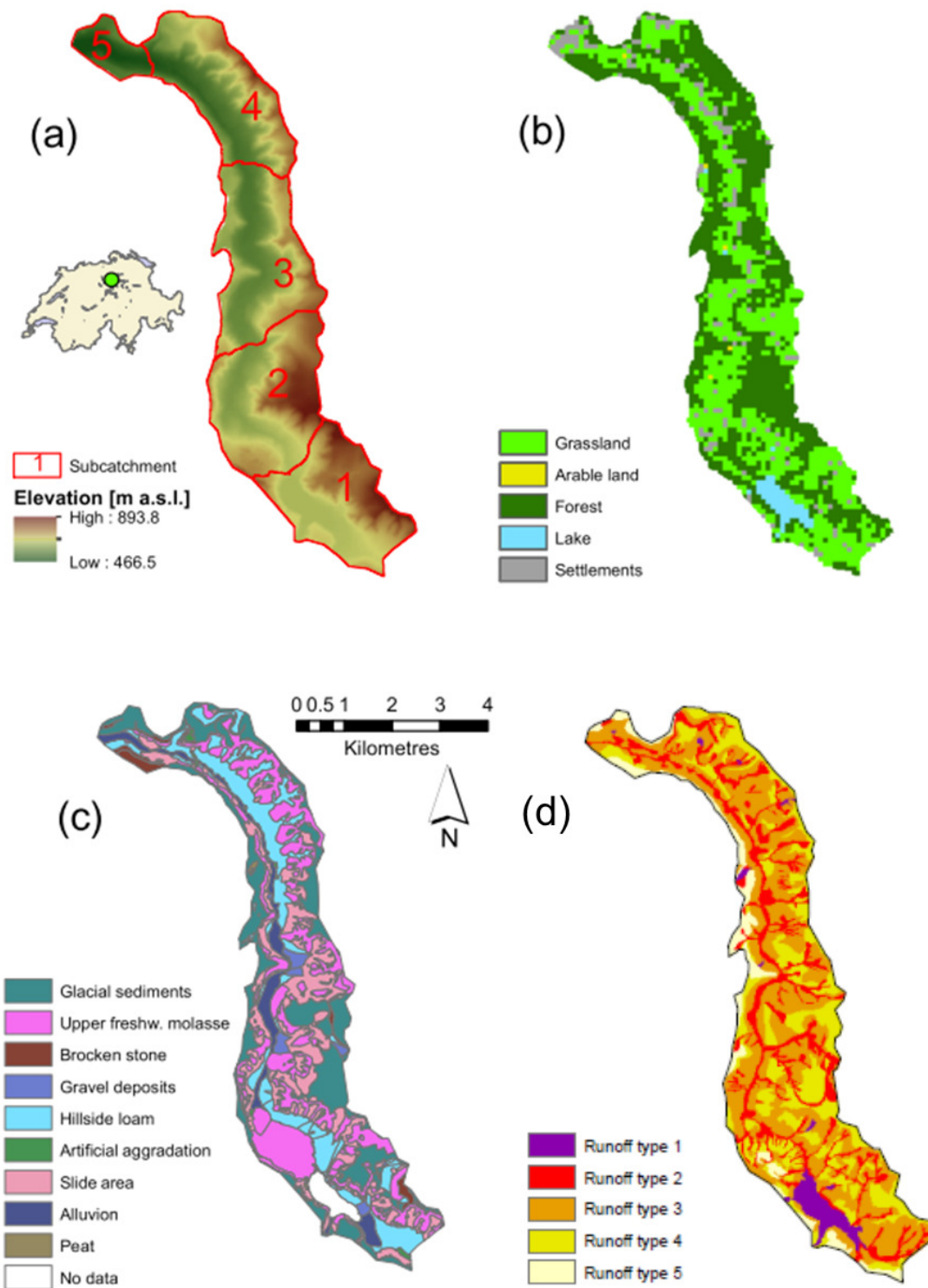


Abb. 17: Übersicht über das EZG der Reppisch und Flächen ähnlicher Abflussbereitschaft (Abflusstypen) (Scherrer AG, 2006; Margreth, 2010).

Tab. 4: Untersuchte Ereignisse (Fallstudie 2 und 3) mit Beginn und Ende der simulierten Zeitspannen.

Emme bis Emmenmatt, Sperbel- und Rappengraben			Reppisch und Meilen		
Name	Simulationsbeginn	Simulationsende	Name	Simulationsbeginn	Simulationsende
Aug05	01.08.2005	31.08.2005	Aug05	01.08.2005	31.08.2005
Sep06	15.09.2006	30.09.2006	Jul09	01.07.2009	31.07.2009
Aug07	18.07.2007	17.08.2007	Jun13	30.05.2013	14.06.2013
Jul09	01.07.2009	31.07.2009	Jul13a	09.07.2014	16.07.2014
Aug10	20.07.2010	09.08.2010	Jul13b	21.07.2014	25.07.2014
Jun11	15.06.2011	07.07.2011	Mai15	01.05.2015	09.05.2015
Okt11	03.10.2010	18.10.2010	Jun15a	07.06.2015	08.06.2015
Jun12	01.06.2012	20.06.2012	Jun15b	14.06.2015	17.06.2015
Jul12	01.07.2012	11.07.2012	Jun16	08.06.2016	23.06.2016
Sep12	23.08.2012	18.09.2012			
Jul13	28.07.2013	02.08.2013			
Sep13	14.09.2013	25.09.2013			
Okt13	10.10.2013	22.10.2013			
Jul14	06.07.2014	19.07.2014			
Aug14	21.07.2014	20.08.2014			
Sep14	29.08.2014	04.09.2014			
Mai15	25.05.2015	31.05.2015			
Jun15	18.06.2015	27.06.2015			
Mai16	11.05.2016	18.05.2016			
Jun16	24.06.2016	01.07.2016			

4.3.2 Ergebnisse der Simulationen

Abbildung 18 zeigt ein Beispiel einer Nachrechnung im EZG der Reppisch. Die berechneten Abflüsse werden zwar leicht überschätzt, zeigen aber gute Resultate.

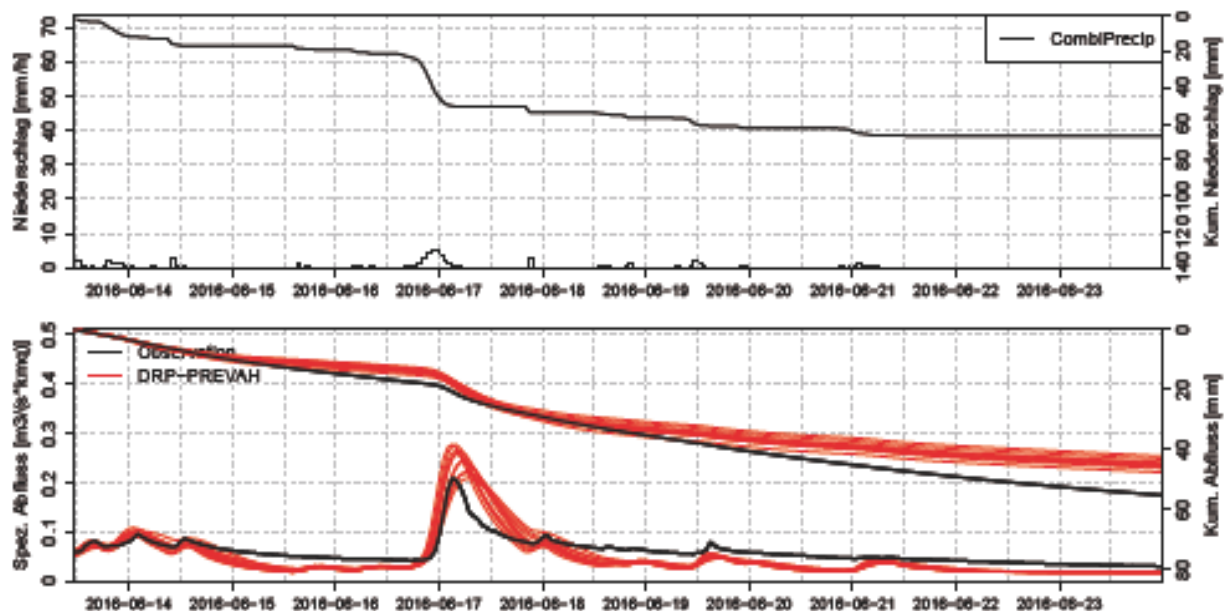


Abb. 18: Ein Beispiel der Nachrechnungen im EZG der Reppisch im Juni 2016.

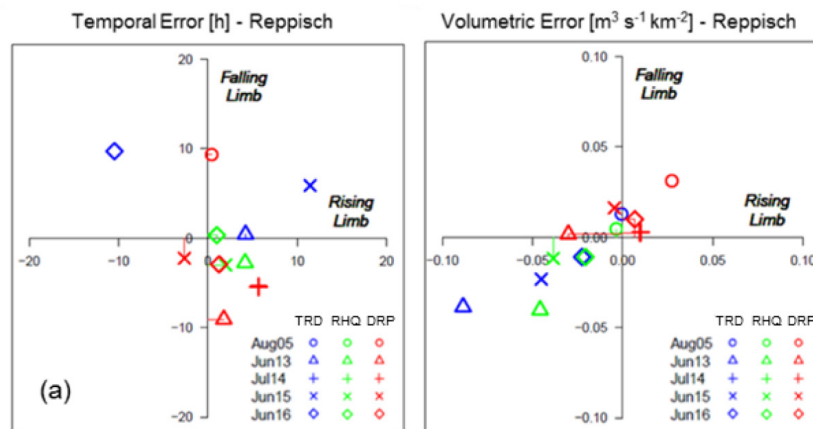


Abb. 19: Ergebnisse der Anwendung des Series-Distance-Ansatzes (Ehret and Zehe, 2011) auf die 5 berechneten Perioden an der Reppisch: (a) Zeitliche Abweichung des steigenden bzw. abfallenden Teils der simulierten Ganglinien. Jeder Punkt entspricht einem Ereignis, das entweder mit dem traditionellen Modell (blau), mit dem Regionalisierungsverfahren nach Viviroli et al. (2009; grün) oder mit dem prozessnahen Modell (rot) berechnet wurde. Eine Linie zeigt, für jedes Ereignis, welche Methode zum besten Simulationsergebnis führt. (b) Volumetrische Abweichung des steigenden bzw. abfallenden Teils der simulierten Ganglinien. Die verschiedenen Farben im Hintergrund stellen die beste Modellkonfiguration für jedes EZG dar (Antonetti et al., 2017).

Je näher um den Nullpunkt sich die Ereignisse anordnen, desto besser ist die Nachrechnung. Bei der zeitlichen Abweichung (links) liegt die Güte des DRP-PREVAH so zwischen dem regionalisierten und dem traditionellen PREVAH. Beim Volumen sämtlicher Nachrechnungen liegt das DRP-PREVAH nahe um den Nullpunkt, d.h. sie zeigen eine gute Performance. Tabelle 5 führt alle nachgerechneten Ereignisse im Dorfbach Meilen und Reppisch auf, bestimmt das beste Modell, bewertet die Leistung des Modells und gibt mögliche Gründe die Abweichungen an.

Tab. 5: Übersichtstabelle der simulierten Ereignisse auf die EZG der Reppisch und Dorfbach Meilen, beste Modellvariante gemäss KGE, Abweichungen zwischen mit DRP-PREVAH simuliertem und gemessenem Abfluss und mögliche Gründe dafür. K = Konvektive Ereignis; DR = Dauerregen; AS = Abflussspitze; AV = Abflussvolumen; N = Niederschlagsintensität; AB = Anfangsbedingungen.

Ereignis	Ereignis-typ	Bestes Modell	Abweichungen zwischen mit DRP-PREVAH simulierten und gemessen Q	Mögliche Gründe für die Abweichungen des DRP-PREVAH
Aug05	K	TRD	Überall AS stark unterschätzt	Schwache N
Jul09	K	DRP	AS und AV leicht überschätzt	Zu feuchte AB oder N überschätzt
Jun13	K	DRP	Meilen: AS stark unterschätzt	Schwache N
Jul13a	DR	DRP	-	-
Jul13b	DR	TRD	Reppisch: AS und AV leicht unterschätzt Meilen: AV leicht überschätzt	Repp.: N unterschätzt Meilen: zu feuchte AB
Mai15	K	DRP	-	-
Jun15a	K	DRP	Überall AS und AV unterschätzt	Schwache N
Jun15b	K	DRP	Überall AS und AV unterschätzt	Schwache N
Jun16	K	DRP	Meilen: AS unterschätzt Reppisch: AS leicht überschätzt	N

Bei den meisten Ereignissen ist DRP-PREVAH das beste Modell. Das Modell unterschätzt zwar die Abflussspitzen meist, zeigt aber bei den Abflussvolumen gute Übereinstimmung. Als Ursachen für die Abweichungen wird oft der Input-Niederschlag, z.T. auch die Anfangsbedingungen gesehen.

4.4 Fallstudie 3: Grosse Einzugsgebiete am Beispiel der Emme (443 km²)

4.4.1 Einzugsgebietsbeschreibung

4.4.1.1 Übersicht

Im Gebiet der Emme bis Emmenmatt befinden neben dem BAFU-Pegel in Emmenmatt drei weitere Pegel: Emme bei Eggiwil (124 km², BAFU-Pegel); Ilfis bei Langnau i.E. (186 km², BAFU-Pegel) und Trueb bei Trubschachen (54 km², Pegel Kanton Bern). Diese Verschachtelung bot die Möglichkeit, die Abflussreaktion von verschiedenen Teileinzugsgebieten in unterschiedlichen Hochwasserereignissen nachzurechnen und so das neue Abflussprozessmodul des RGM-Modelles zu und zu verbessern. Ebenfalls untersucht wurden die beiden mit BAFU-Pegeln ausgestatteten Einzugsgebiete des Sperbelgrabens und des Rappengrabens. Sie liegen ausserhalb des Hauptuntersuchungsgebietes, unweit des nördlichen Randes vom Ilfis-EZG (vgl. Abb. 20).



Abb. 20: Untersuchungsgebiete: Emme (bis Emmenmatt) mit Teileinzugsgebieten, Sperbel und Rappengraben.

4.4.1.2 Geologie und Landschaft

Die geologische Zusammensetzung des EZG wird von fünf verschiedenen tektonischen Einheiten bestimmt (Steiner, 2007; Abbildung 21). Die helvetische Randkette der Wildhorndecke bildet einen markanten Übergang vom höheren Mittelland ins Voralpengebiet. In diesem Gebiet wechseln sich Steiflanken aus harten Kieselkalk- und Schrätkalkschichten und flache Bänder aus Mergelschichten ab; darunter liegt die ultrahelvetische Flyschzone, welche aus weicheren Gesteinen (schiefrige Mergel und Sandsteine) besteht. Die subalpine Molasse, die nördlich der Flyschzone aufgeschlossen ist, bildet ausgeprägte Hügelzüge aus (z.B. Marbachegg). Unter der Subalpinen Molasse liegt die Mittelländische Molasse. Sie besteht aus der Oberen Süsswassermolasse (OSM), der Oberen Meeresmolasse (OMM) und der Unteren Süsswassermolasse (USM). Die OSM wird hauptsächlich aus Mergel, Sandstein und Nagelfluh aufgebaut. Sie nimmt vor allem die nördlichen Teile der Ilfis und der Trueb und einen kleinen Bereich im Zwischengebiet zwischen Eggiwil und Emmenmatt ein (vgl. Abb. 21). Die Obere Meeresmolasse (OMM) besteht zu einem grossen Teil aus mächtigen Sandsteinen. Sie ist in grösseren Gebieten der Ilfis und im südlichen Bereich der Trueb aufgeschlossen. Im Zwischengebiet zwischen Eggiwil und Emmenmatt ist die OMM vielerorts durch Moränen bedeckt. Die USM, die ebenfalls aus Sandsteinen und Mergeln aufgebaut ist, ist nur in kleineren Gebieten im Einzugsgebiet der Ilfis und im Zwischengebiet zwischen Eggiwil und Emmenmatt sichtbar.

Die Bildung des Emmentaler Talbodens wurde durch verschiedene Eiszeiten des Quartärs geprägt. Durch vorrückende Gletscher lagerten sich Moränen und Schotter ab, welche später durch die Emme wieder erodiert wurden. So wurden die noch heute sichtbaren Terrassen, Kuppen und Schachen gebildet. Im Gegensatz zum restlichen Emmental blieb das Napfgebiet in der letzten grössten Eiszeit teilweise eisfrei und war der fluvialen Erosion ausgesetzt (Steiner, 2007).

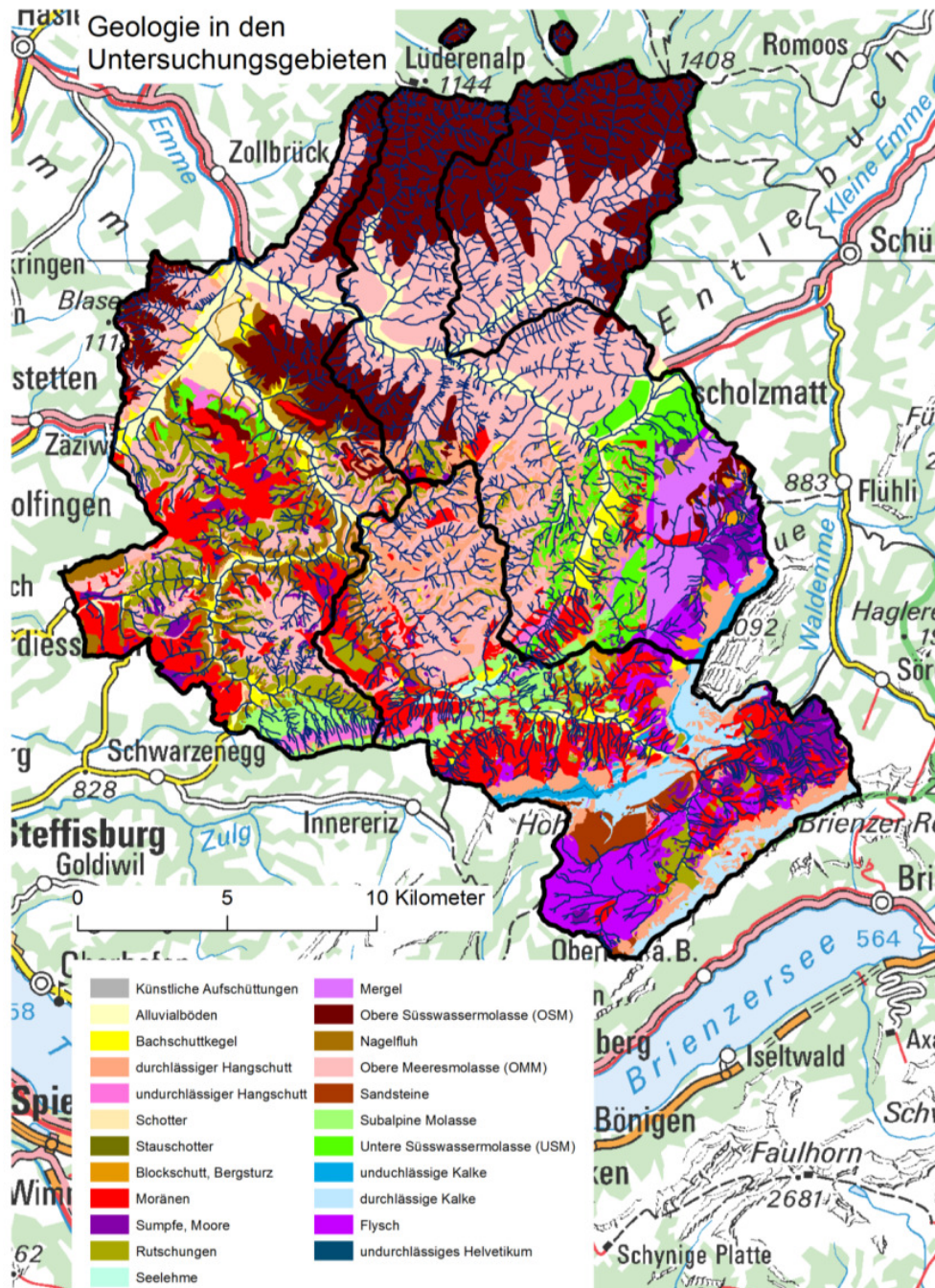


Abb. 21: Geologie in den Untersuchungsgebieten (Emme (bis Emmenmatt), Spärbel- und Rappengraben).

4.4.1.3 Automatisierte Prozesskartierung

Für grössere Gebiete lohnt es sich zur Erstellung einer Abflussprozesskarte ein automatisiertes Verfahren zu verwenden. Die im EZG der Emme (Emmenmatt) verwendete Methode basiert auf Ergebnissen einer Forschungsarbeit, die in zwei kleinen EZG im Kanton Zürich entwickelt wurde (Schmocker-Fackel et al., 2007). Sie wurde für den gesamten Kanton Zürich (1'830 km², Margreth et al., 2010, Scherrer AG, 2010), für die Kleine Emme (460 km², Scherrer & SoilCom, 2010) und für die Ilfis (188 km², Scherrer & SoilCom, 2012) eingesetzt und hat sich als wichtiger Input für die Berechnung von Hochwasserabflüssen bewährt. Aufgrund der Unterschiede in der Bodenbeschaffenheit und in den geologischen Eigenschaften musste das Regelwerk zur Anwendung in der Emme angepasst werden. Der Aufwand für diese Anpassungen war verhältnismässig moderat; denn der geologische Aufbau in der Emme oberhalb Emmenmatt ist ähnlich wie im Gebiet der Kleinen Emme oder auch in der Ilfis, was ein wichtiges Kriterium für die Wahl der Emme als Untersuchungsgebiet darstellte.

Da ein automatisches Verfahren digitale Daten erfordert, musste das Regelwerk von Scherrer & Naef (2003) vereinfacht werden. Die Hochwasserabflussbildung hängt stark von der Infiltrations- und Speicherkapazität des Bodens und des darunterliegenden Untergrundes ab (Scherrer et al, 2007; vgl. auch Kap. 3.2.). Die Geländeneigung spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Wesentliche Inputdaten für die automatisierte Herleitung von Abflussprozesskarten sind detaillierte Bodenkarten (1:5'000, 1:25'000), geologische Karten (1:25'000) und das digitale Terrainmodell der Amtlichen Vermessung (DTM-AV; 2 x 2 Meter Zellgrösse). Eine detaillierte Beschreibung des Regelwerkes befindet sich im Anhang I. Aufgrund der Bodenwasserhaushaltsgruppen (BWHG) lassen sich Aussagen über die Speicher- und Infiltrationsfähigkeit eines Bodens machen. Sie bilden einen zentralen Parameter in Bodenkarten. Wie in vielen Gebieten der Schweiz, fehlen im EZG der Emme (Emmenmatt) detaillierte Bodenkarten (Massstab 1:5'000 oder 1:25'000). Deshalb wurden die BWHG mit Hilfe eines Bodenprognosemodells prognostiziert. Dieses GIS-gestützte Verfahren, das in Python programmiert ist, wurde am Institut für Umweltingenieurwissenschaften der ETH Zürich für die Waldgebiete des Kantons Zürich entwickelt (Margreth et al., 2010) und danach für die Anwendung in den EZG der Kleinen Emme und der Ilfis erweitert.

Die Bodenbildung wird beeinflusst durch die bodenbildenden Faktoren wie Geologie, Relief, Klima, Vegetation und Mensch. Bodenprognosemodelle nutzen die Zusammenhänge zwischen diesen Faktoren und der an einem Standort ausgebildeten Bodenform (Bodentyp, Bodenart, Substrat), um anhand von verfügbaren Daten wie dem hoch aufgelösten digitalen Terrainmodell (DTM-AV), der geologischen Karte, dem digitalen Landschaftsmodell (VECTOR 25) und dem digitalen Gewässernetz einen Bodenparameter, wie hier die BWHG, zu prognostizieren.

4.4.1.4 Anpassung des Verfahrens in einem Testgebiet

Um den Zusammenhang zwischen den bodenbildenden Faktoren und den BWHG möglichst exakt erfassen zu können, wurde das Bodenprognosemodell in einem kleinen Testgebiet anhand von räumlich hoch aufgelösten Bodenaufnahmen geeicht. Im EZG der Emme (Emmenmatt) war hierzu nur ein Testgebiet notwendig, weil zahlreiche geologische Einheiten im Einzugsgebiet der Emme auch in der Ilfis und in der Kleinen Emme aufgeschlossen sind. Im EZG der Kleinen Emme wurde das Verfahren anhand von vier und in der Ilfis anhand sechs Testgebieten geeicht. Der Anpassungsbedarf in den schon bekannten geologischen Einheiten war deshalb geringer als in einem Gebiet mit unbekannter Geologie. Nach Abschluss der Eichung wurde, basierend auf den synthetisch hergeleiteten BWHG, eine Abflussprozesskarte automatisiert hergeleitet (vgl. Abb. 22, unten). Anhand eines Vergleiches mit einer manuell erstellten Abflussprozesskarte (Referenzgebiet, Abb. 22 oben), basierend auf Feldbegehungen und Bodenaufnahmen, liess sich die automatisiert hergeleitete Karte prüfen. In Abbildung 22 sind die Abflusstypen dargestellt. Sie zeigen die Abflussreaktion der verschiedenen Prozessflächen an und lassen sich aus den Abflussprozessflächen herleiten.

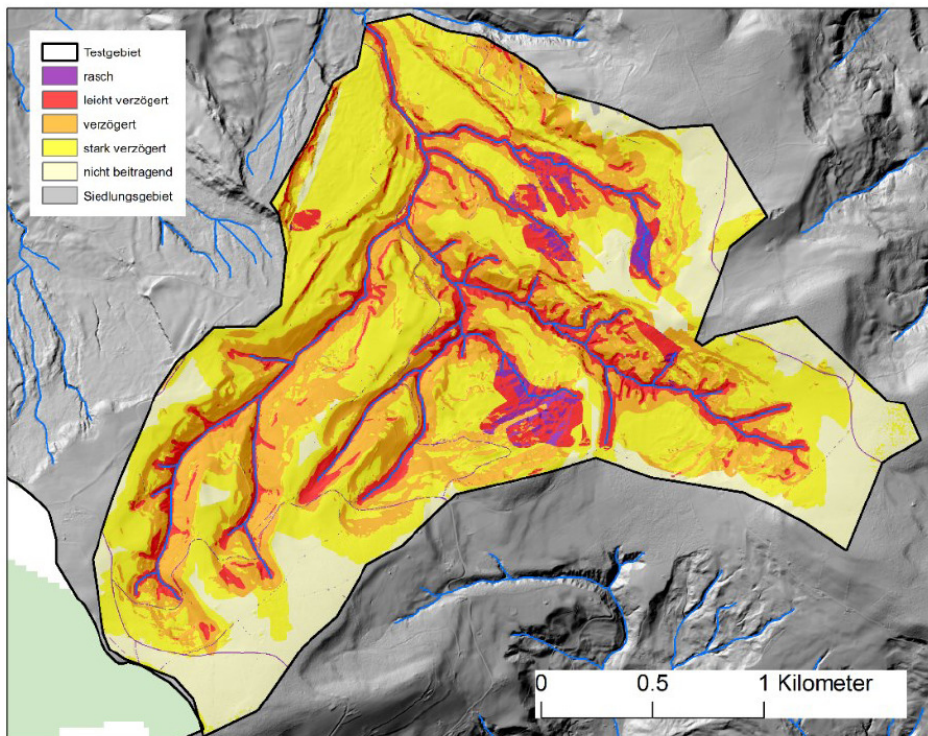
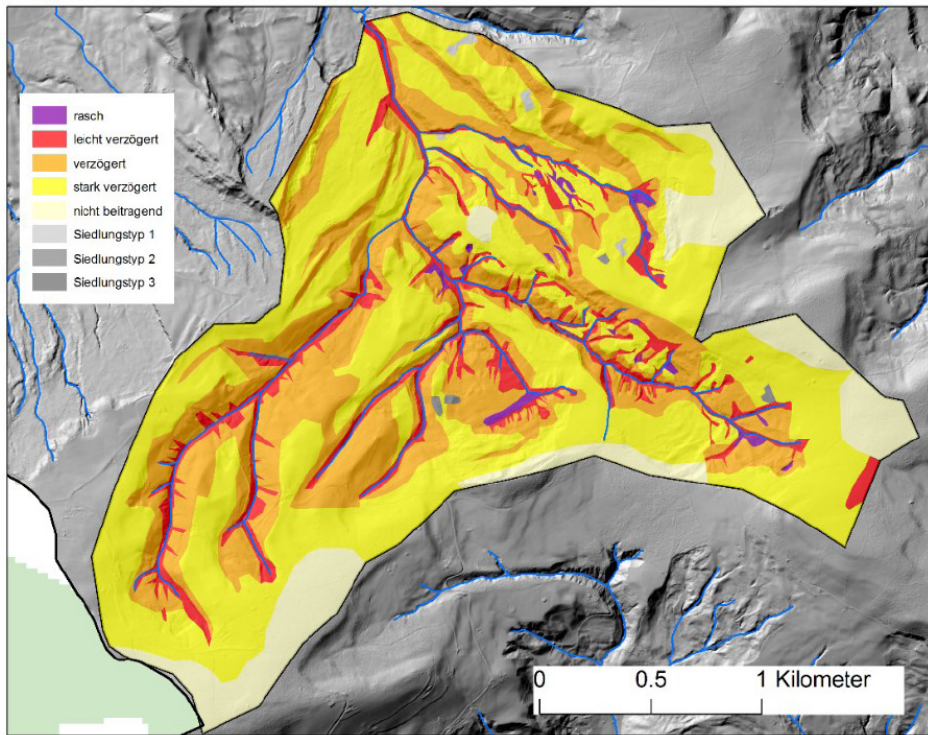


Abb. 22: Manuell kartierte (oben) und automatisierte hergeleitete Abflusstypenkarte für das Testgebiet im Einzugsgebiet der Emme (Emmenmatt).

Tabelle 4: Übereinstimmungen und Abweichungen der manuell und automatisiert hergeleiteten Abflussprozesse im Testgebiet.

		% der Fläche
Übereinstimmung		57.8
Automatisches Verfahren überschätzt die Abflussreaktion um:	1 Stufe	17.3
	2 Stufen	3.1
	3 Stufen	0.7
	4 Stufen	0.1
Automatisches Verfahren unterschätzt die Abflussreaktion um:	1 Stufe	19.4
	2 Stufen	1.3
	3 Stufen	0.3

In rund 58% stimmt die automatisiert hergeleitete mit der manuell kartierten Abflussprozesskarte überein (vgl. Tabelle 4). In 95% der Flächen schätzt die automatische Methode die Abflussbereitschaft gleich hoch oder mit einer Stufe Abweichung ein wie die manuelle. Dieses Ergebnis ist gut, da sich die Abweichungen meist auf kleinem Raum ausgleichen. Damit lässt sich die Abflussbereitschaft auch von kleineren Teileinzugsgebieten zuverlässig abschätzen.

4.4.2 Abflussprozesskarte für die gesamte Emme oberhalb Emmenmatt

Nach Abschluss der Eichung wurde das Verfahren auf das gesamte EZG der Emme (Emmenmatt) angewendet. In einer Feldkampagne wurde die hergeleitete Abflussprozesskarte an 19 Standorten überprüft. Bei der Standortauswahl wurde das Hauptaugenmerk auf Gebiete gerichtet, wo die in der Karte ausgewiesenen Abflussprozesse aufgrund der Topographie/Geländeform, aufgrund der Geologie oder aufgrund von generalisierten Informationen der geologischen Karten als unplausibel erschienen. Die Standorte sind in den Abbildungen F1 bis F4 im Anhang I dargestellt.

Beim Vergleich der im Feld erhobenen und automatisiert hergeleiteten Abflussprozesse an den ausgewählten Untersuchungsstandorten ergibt sich folgende Bilanz: An 9 der 18 Standorte stimmen automatisch und manuell bestimmte Abflussprozesse überein (Tabelle 5). An insgesamt 7 Standorten wurde die Abflussreaktion mit dem automatischen Verfahren über- und an 3 unterschätzt. An 5 Standorten war eine Abweichung um eine an 4 um zwei Stufen beobachtet worden.

Tabelle 5: Übereinstimmungen und Abweichungen der manuell und automatisiert hergeleiteten Abflussprozesse an den 18 Validierungsstandorten.

		Standorte
Insgesamt untersuchte Standorte		18
Übereinstimmung		9
Automatisches Verfahren überschätzt die Abflussreaktion um:	1 Stufe	3
	2 Stufen	4
Automatisches Verfahren unterschätzt die Abflussreaktion um:	1 Stufe	2
	2 Stufen	1

Bezüglich Übereinstimmung und Abweichungen ist das Ergebnis mit dem im Testgebiet vergleichbar. Daraus lässt sich schliessen, dass das Regelwerk zur Herleitung der BWHG und der Abflussprozesskarte ziemlich robust ist. Dies zeigen auch die Studien im Kanton Zürich (Margreth et al., 2010), in der Kleinen Emme (Scherrer & SoilCom, 2010), in der Ilfis (SoilCom, 2012), ebenso wie eine Untersuchung des verwendeten Bodenprognosemodells im Raum Sursee (SoilCom & UWE, 2015). Besonders anspruchsvoll war die automatisierte Herleitung der BWHG in Gebieten mit Moränen, Rutschungen, subalpiner Molasse und in Feuchtgebieten.

In Abbildung 23 ist die Abflusstypenkarte für das gesamte Untersuchungsgebiet dargestellt. Die Kuchendiagramme zeigen die Zusammensetzung der Abflusstypen der einzelnen Teileinzugsgebiete. Die Reaktion des gesamten Gebietes ist vergleichbar mit der der Kleinen Emme. Am stärksten reagieren die beiden Kleinstgebiete Sperbel- und Rappengraben. Die Abflusstypen 1 und 2 nehmen rund 40%, Abflusstyp 3 über 50% der Einzugsgebietsfläche ein. Stark verzögert reagieren nur gerade 7 bzw. 6% des Einzugsgebietes. Von den Teileinzugsgebieten der Emme (Emmenmatt) weist die Trueb die stärkste Abflussreaktion auf. Die Ilfis (Langnau) und die Emme (Eggiwil) zeigen eine ähnliche Zusammensetzung der Abflussprozesse. Dort sind es vor allem die Flyschzonen im oberen Teil der Einzugsgebiete mit einem hohen Anteil an Abflusstypen 1 und 2, die am stärksten reagierenden. In allen drei Gebieten, Trueb, Ilfis und Emme (Eggiwil) dominieren steile Hänge, die für einen hohen Anteil an Abflusstypen 3 verantwortlich sind. Das Zwischengebiet Eggiwil bis Emmenmatt weist im Vergleich zu den übrigen Teilgebieten wesentlich mehr stark bis sehr stark verzögert reagierende Gebiete auf. Diese sind bedingt durch einen hohen Anteil an normal durchlässigen und tiefgründigen Böden auf Moränen und Schottern.

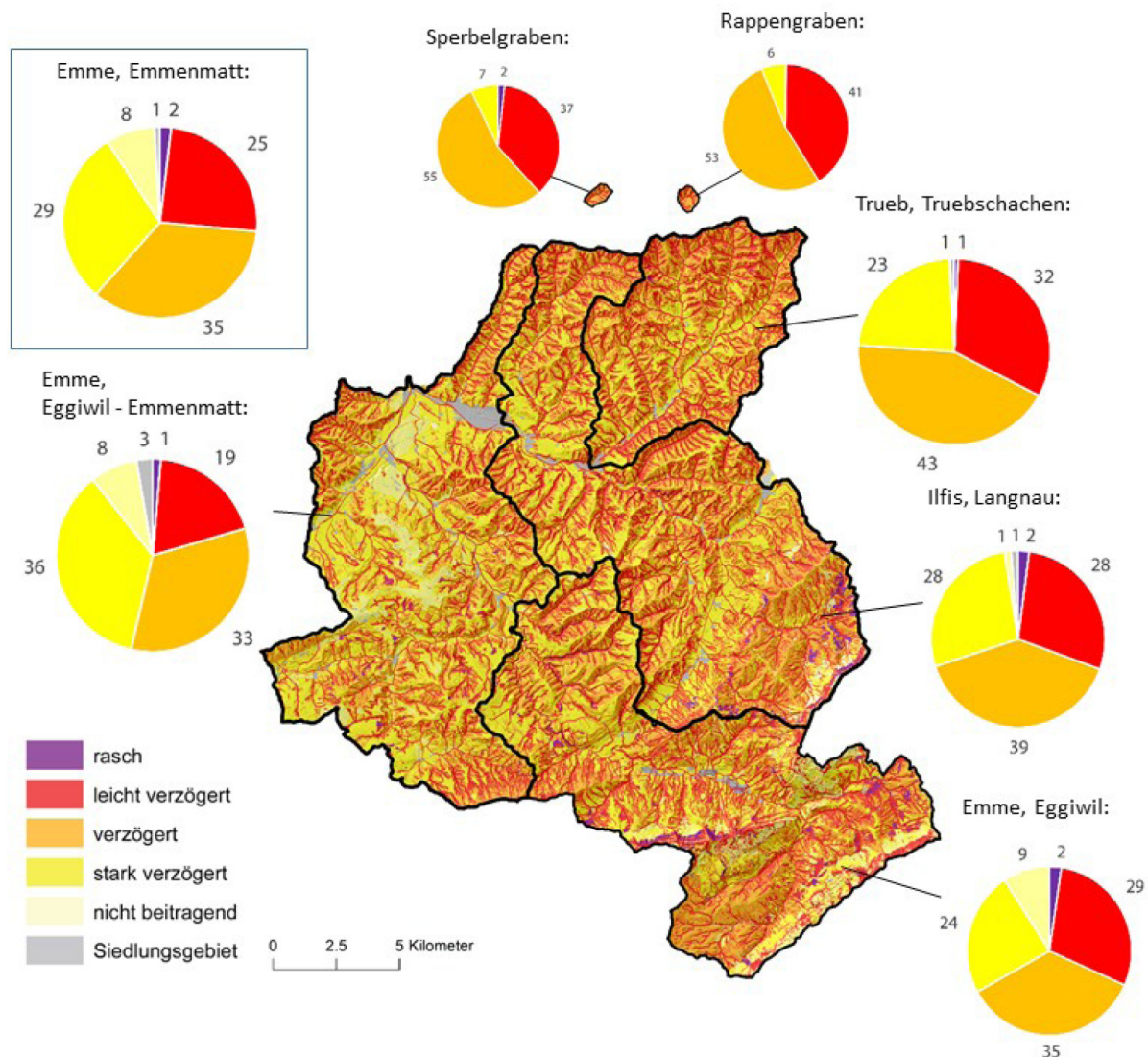


Abb. 23: Automatisiert hergeleitete Abflusstypenkarte für die Emme (bis Emmenmatt).

4.4.3 Ergebnisse der Simulationen

Im Gebiet der Emme bis Emmenmatt befinden sich noch drei weitere Pegel: Emme bis Eggiwil (124 km²); Ilfis bei Langnau i.E. (186 km²) und Trueb bei Trubschachen (54 km²). Diese wurden für die Simulationen im vorliegenden Bericht verwendet.

4.4.3.1 Hochwasser 2005 und Übersicht der Ergebnisse

Das prozessnahe Abflussbildungsmodul war in der Lage, die Ereignisse mit zufriedenstellender Güte nachzubilden. Abbildung 24 zeigt als Beispiel wie das Abflussvolumen für die EZG der Emme bis Emmenmatt und der Ilfis bis Langnau beim Hochwasser 2005 gut eingeschätzt wurde, während es für das EZG der Emme bis Eggiwil stark unterschätzt bzw. für die EZG der Trueb, Sperbelgraben und Rappensgraben, leicht überschätzt wurde. Dieses Verhalten wurde auch für die anderen simulierten Ereignisse beobachtet (vgl. Tab. 6 und Anhang F) und kann aus verschiedenen möglichen Gründen entstanden sein (siehe unten).

Tabelle 6 führt als Übersicht alle nachgerechneten Ereignisse im Emme-EZG auf, bestimmt das beste Modell und bewertet die Leistung des Modells und gibt mögliche Gründe die Abweichungen an. Bei einigen Ereignissen ist das DRP-PREVAH das beste Modell, wobei das Modell die Abflussspitzen meist unterschätzt, etwas verlangsamt ist, das Volumen jedoch einigermassen nachbildet.

Die verlangsamte Reaktion und das Unterschätzen der Abflussspitze kann zu einem grossen Teil modelltechnisch begründet sein. Die Nachbildung der Abflusskonzentration des unterirdischen Abflusses ist stark vereinfacht in DRP-PREVAH berücksichtigt, indem sie mit einer einzigen Gebietsspeicherkonstante GS1H nachgebildet wird (vgl. Kapitel 3.4.4). Ein Ansatz, der die Grösse der Teil-EZG und die Gewässerdichte jedes Teil-EZGs berücksichtigt, könnte beispielsweise dieses Problem lösen. Die Überschätzung der Abflussspitzen in den kleinen EZG Sperbelgraben und Rappengraben ist möglicherweise auf falsch eingeschätzten Anfangsbedingungen rückführbar, da die Feldkapazität aus der groben Bodeneignungskarte wohl stark unterschätzt werden dürfte (nicht gezeigt).

Abbildung 24, Tabelle 6 und Anhang F zeigen zudem, dass die Abflüsse des EZG der Emme bis Eggwil oft stark unterschätzt, bzw. die EZG der Trueb, Sperbelgraben und Rappengraben leicht überschätzt werden. Mögliche Gründe können die verwendeten gegitterten Niederschlagsdaten sein, die aufgrund der zeitlichen und räumlichen Auflösung (1 km^2 , 1 h) nicht in der Lage sind, konvektive Ereignisse mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen. Typische, mit dem Radar verbundene Probleme (z.B. Abschirmungen) könnten zudem einen Einfluss auf die Niederschlagsmenge und -verteilung haben, was sich je nach Grösse der Abweichungen direkt auf die Abflusssimulationen auswirkt. So werden beispielsweise in den höchsten Lagen im Oberlauf der Emme oberhalb Eggwil selten grosse Niederschläge ausgemacht, obwohl dies von der Anströmung und den Staueffekten zu erwarten wäre. Eine Nachrechnung dieser Ereignisse mit verschiedenen Niederschlagszeitreihen, die auf Bodenstationen beruhen, könnte dazu dienen, den Ursprung dieser Abweichungen abzuklären. Das Ausmass der systematischen Abweichungen in Eggwil und Trubschachen (gemessen / gerechnet) lassen allerdings auch vermuten, dass diese beiden (hydraulisch ungeprüften) Pegelstationen Unsicherheiten im Hochwasserbereich aufweisen dürften. Dass diese beiden Ursachen für Abweichungen die abschliessende Beurteilung der Güte des Modells stark einschränken, ist unschön.

Tab. 6: Übersichtstabelle der im EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen Teil-EZG simulierten Ereignisse mit bestem Modell gemäss KGE, Abweichungen zwischen mit DRP-PREVAH simuliertem und gemessenem Abfluss und mögliche Gründe dafür. K = Konvektive Ereignis; DR = Dauerregen; AS = Abflussspitze; AV = Abflussvolumen; N = Niederschlagsintensität; AB = Anfangsbedingungen.

Ereignis	Ereignis- typ	Bestes Modell	Abweichungen zwischen DRP-PREVAH simulierten und gemessen Q	Mögliche Gründe für Abweichungen des DRP-PREVAH
Aug05	DR	VIVI	Emmenmatt u. Eggiwil: 1. AS um 20% unterschätzt und verspätet Ilfis: AS um 20% unterschätzt, AV ok Sperbel u. Rappengr.: AS ok, AV überschätzt	Abflusskonzentration oder N unterschätzt Sperbel u. Rappengraben: N leicht überschätzt
Sep06	DR	DRP	Eggiwil: AS um 30% unterschätzt Trueb: AS und AV leicht überschätzt Sperbel u. Rappengr.: AS überschätzt	Eggiwil u. Trueb: Pegel? Sperbel. u. Rappengr.: zu feuchte AB
Aug07	DR	DRP	Überall AS stark unterschätzt Sperbel u. Rappengr.: 1. AS überschätzt	Schwache N Sperbel. u. Rappengr.: zu feuchte AB
Jul09	K+DR	VIVI	Emmenmatt u. Eggiwil: 1. AS leicht unterschätzt und verspätet konvektives Ereignis stark unterschätzt	Abflusskonzentration oder N unterschätzt K: N stark unterschätzt
Aug10	K	DRP	an allen Pegeln konvektive Ereignis stark unterschätzt	N stark unterschätzt
Jun11	K	VIVI	Eggiwil: AS stark unterschätzt Trueb: AS und AV leicht überschätzt	Pegel?
Okt11	DR	TRD	Eggiwil: AS stark unterschätzt Trueb: AS und AV leicht überschätzt	Pegel?
Jun12	K	DRP	Eggiwil: AS stark unterschätzt Trueb: AS und AV leicht unterschätzt	Schwache N
Jul12	K	DRP	an allen Pegeln wurde das konvektive Ereignis stark unterschätzt	N stark unterschätzt
Sep12	K+DR	DRP	Eggiwil: AS stark unterschätzt Trueb: AS und AV leicht überschätzt	Pegel?
Jul13	K	DRP	an allen Pegeln AS um 30% unterschätzt	Schwache N, zu langsame Entwässerung
Sep13	DR	VIVI	Eggiwil: AS stark unterschätzt Trueb: AS und AV leicht überschätzt	Pegel?
Okt13	K	remis	Eggiwil: AS stark unterschätzt Trueb: AS und AV stark überschätzt Sperbel u. Rappengr.: AS überschätzt	Eggiwil u. Trueb: Pegel? Sperbel. u. Rappengr.: zu feuchte AB
Jul14	K+DR	TRD	Eggiwil: AS unterschätzt Ilfis: AS am 7.7.14 stark unterschätzt	N stark unterschätzt
Aug14	K+DR	DRP	Eggiwil: AS stark unterschätzt Trueb: AS und AV leicht überschätzt Sperbel u. Rappengr.: AS überschätzt	Eggiwil u. Trueb: Pegel? Sperbel. u. Rappengr.: zu feuchte AB
Sep14	K	VIVI	Eggiwil: AS stark unterschätzt Trueb: AS und AV überschätzt Sperbel u. Rappengr.: AS überschätzt	Eggiwil u. Trueb: Pegel? Sperbel. u. Rappengr.: zu feuchte AB
Mai15	K	remis	Eggiwil: AS stark unterschätzt Trueb: AS und AV leicht überschätzt Sperbel u. Rappengr.: AS überschätzt	Eggiwil u. Trueb: Pegel? Sperbel. u. Rappengr.: zu feuchte AB
Jun15	K	TRD	Eggiwil: AS stark unterschätzt Trueb: AS und AV um 50% überschätzt Sperbel u. Rappengr.: AS überschätzt	Eggiwil u. Trueb: Pegel? Sperbel. u. Rappengr.: zu feuchte AB
Mai16	DR	TRD	Eggiwil: AS stark unterschätzt Trueb: AS und AV leicht überschätzt Sperb. u. Rappengr.: AS leicht übersch.	Eggiwil u. Trueb: Pegel? Sperbel. u. Rappengr.: zu feuchte AB
Jun16	K	VIVI	Eggiwil: AS stark unterschätzt Trueb: AS und AV leicht überschätzt Sperbel u. Rappengr.: AV überschätzt	N stark überschätzt

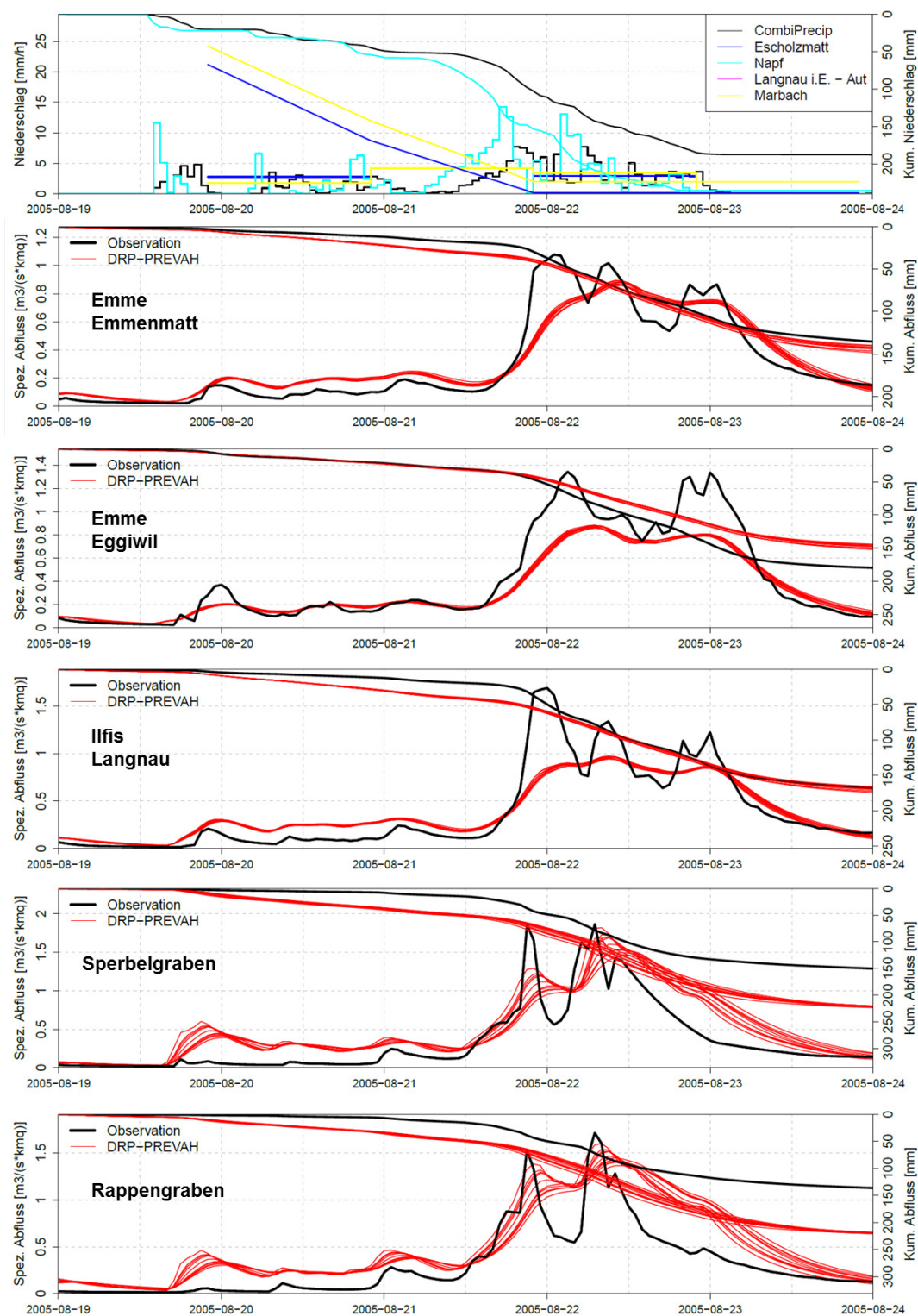


Abb. 24: Starkniederschlagsereignis am 21.-23.8.2005 im EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Teil-EZG. Die durchschnittliche Niederschlagsintensität übers Gebiet gemäss CombiPrecip (schwarz) sowie die an nahegelegenen meteorologischen Stationen gemessenen Niederschlagsintensitäten sind dargestellt. Die roten Ganglinien wurden mit dem prozessbasierten Modell simuliert.

4.4.3.2 Vergleich zwischen dem prozessnahen Abflussbildungsmodul und dem traditionellen PREVAH

Ein grosser Unterschied zwischen dem traditionellen PREVAH und DRP-PREVAH besteht darin, dass einerseits das räumliche Auftreten des Abflusses im EZG aufgezeigt werden kann und andererseits auch die Herkunft des Wassers gemäss Abflusstyp differenziert ausgegeben werden kann. Wie in Abbildung 25 dargestellt, gibt das prozessnahe Modell eine realistische Verteilung der Prozesse wieder. Während Flächen mit rascher Abflussbereitschaft (RT1, violett) die stärkste Reaktion auf Niederschlag und die schnellste Speicherentleerung aufweisen, liefern nicht beitragende Flächen (RT5, grau) keinen Abfluss. Je nach Flächenverteilung der Abflusstypen ergeben sich von EZG zu EZG neue Muster.

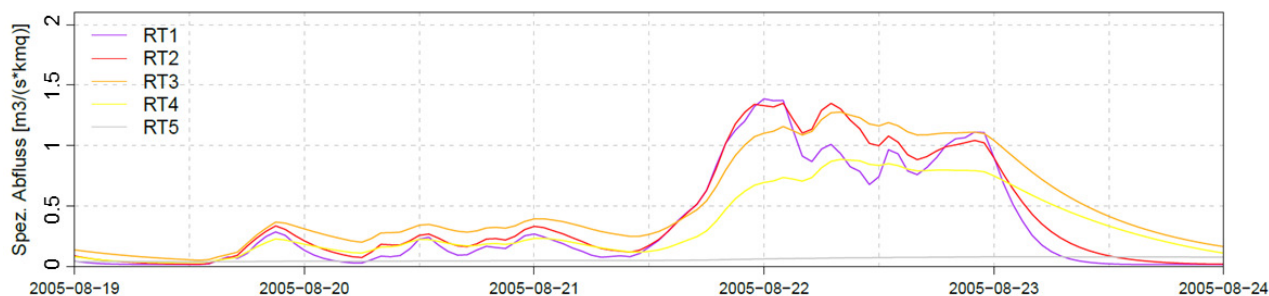


Abb. 25: Spezifische Beiträge der fünf verschiedenen Abflusstypen im Beispiel vom EZG der Emme bis Emmenmatt während der Ereignisse im August 2005. RT = Runoff Type (Abflusstyp).

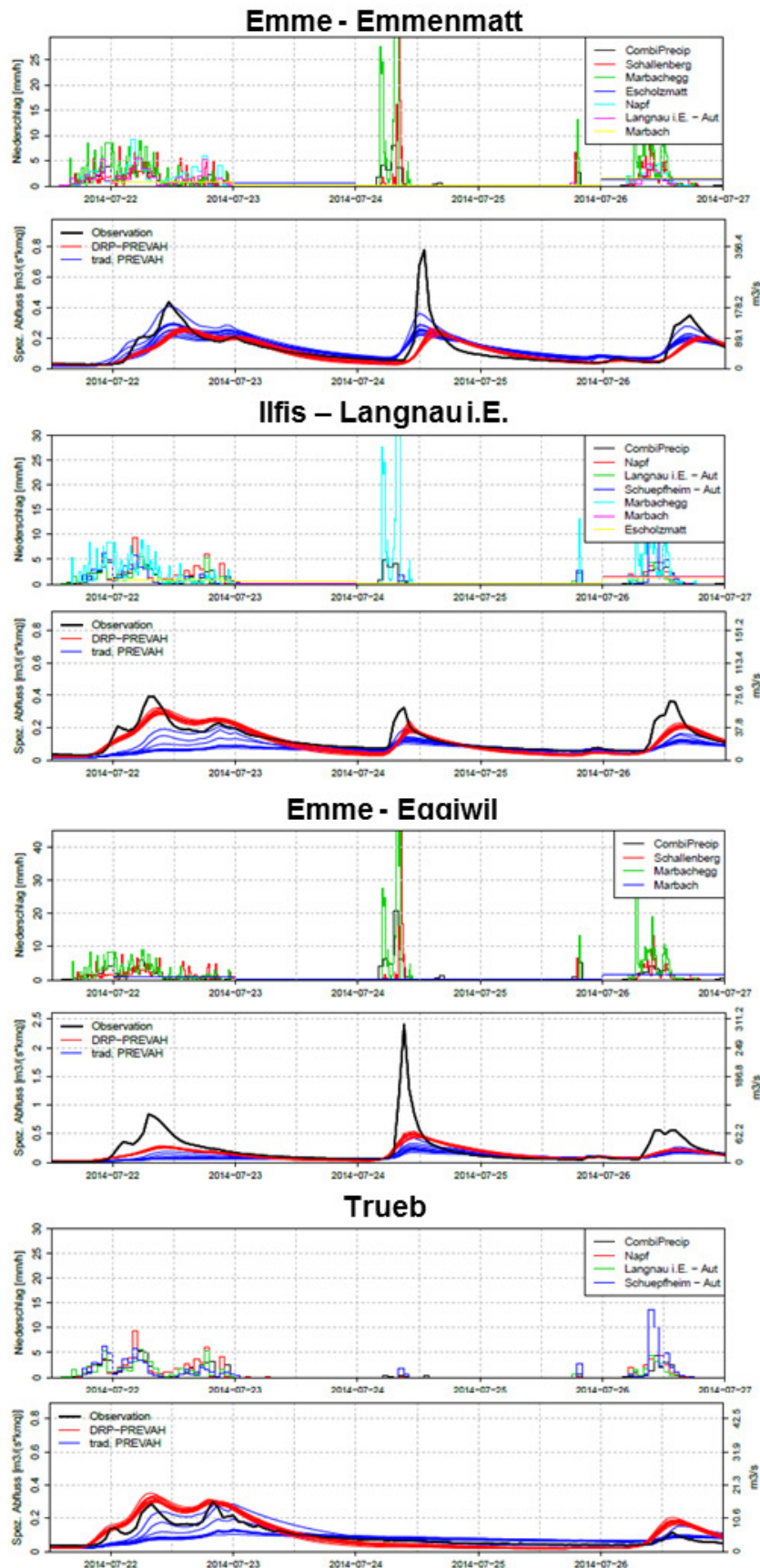


Abb. 26: Starkniederschlagsereignis am 24.7.2014 im EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Teil-EZG. Für jedes Teil-EZG sind die gebietsdurchschnittliche Niederschlagsintensität gemäss CombiPrecip (schwarz) sowie die an nahegelegenen meteorologischen Stationen gemessenen Niederschlagsintensitäten dargestellt. Die blauen Ganglinien wurden mit dem unkalibrierten traditionellen PREVAH, und die roten Ganglinien mit dem prozessbasierten Modell simuliert.

Abbildung 26 zeigt, wie das prozessnahe Abflussbildungsmodell die Ereignisse am 24.7.2014 besser als das traditionelle unkalibrierte PREVAH nachrechnen konnte, vor allem hinsichtlich des Vorereignisses am 22.7.2014. Die stark unterschätzten Niederschlagsintensitäten aus CombiPrecip verunmöglichten allerdings die korrekte Nachrechnung der Abflussspitze am 24.7.2014 in den EZG Emme (Eggiwil und Emmenmatt).

4.4.3.3 Die Abflusstypenkarten und das prozessnahe Abflussbildungsmodell als Regionalisierungsverfahren

Das prozessnahe Abflussbildungsmodell wurde zudem als Regionalisierungs-Tool geprüft, indem es an zwei verschiedenen Konfigurationen des traditionellen PREVAH getestet wurde: In der erste Variante wird das traditionelle Modell auf das kleinste EZG kalibriert, indem die zehn besten Parameterkombinationen aus einer Montecarlo-Simulation mit 2000 Läufen ausgewählt und auf die anderen EZG angewendet werden. Als Kalibrierungsperiode für diese Variante wurde die Zeitspanne zwischen dem 6. und dem 19. Juli 2014 gewählt. Die Wahl eines anderen Kalibrierungsereignisses änderte die erzielten Ergebnisse nicht (nicht gezeigt). Für die zweite Variante wurden die Parameter aus der Studie von Viviroli et al. (2009b) verwendet, die eine Regionalisierung von PREVAH-Parametern für die ganze Schweiz basierend auf der Kalibrierung von 140 EZG durchgeführt haben. Die Parameterwerte nach Viviroli et al. (2009b) für jedes EZG sind im Anhang G dargestellt.

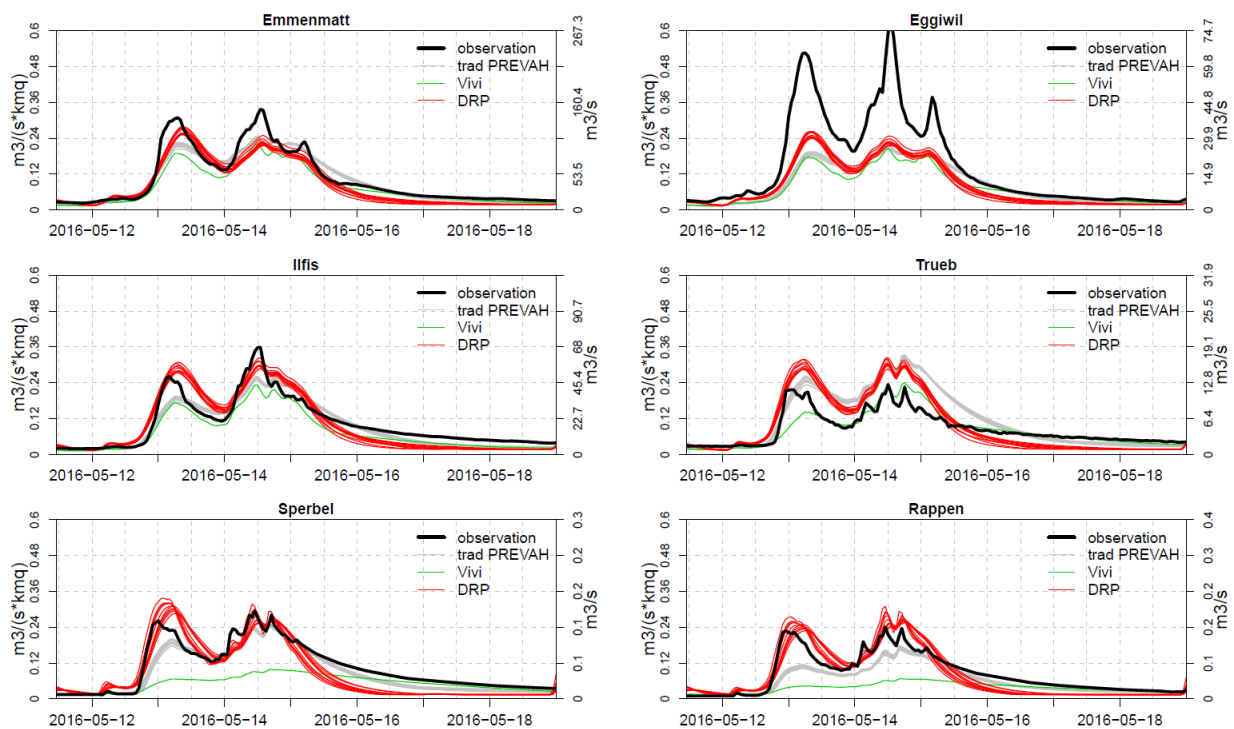


Abb. 27: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Teil-EZG. Die grauen Ganglinien wurden mit dem traditionellen PREVAH, die grünen Ganglinien mit dem Regionalisierungsverfahren nach Viviroli et al. (2009b) und die roten Ganglinien mit dem prozessbasierten Modell simuliert.

In Abbildung 27 sind als Fallbeispiel die Ergebnisse aus der Simulation des Ereignisses vom 13.05.2016 bis zum 16.05.2016 dargestellt. Generell ist das prozessnahe Modell in der Lage, die Abflussspitzen besser als die anderen Modellkonfigurationen nachzubilden. Im Teil-EZG der Emme bis Eggiwil sind die Abflussspitzen von allen Modellkonfigurationen unterschätzt, die möglichen Gründe wurden bereits ausgeführt (siehe auch Ereignisanalyse im Anhang F und H).

Die Analyse der Ergebnisse mit dem Series-Distance-Ansatz ermöglicht eine Aussage über die zeitlichen und volumetrischen Abweichungen der simulierten Ereignisse von dem gemessenen Abfluss (vgl. Abb. H3 und H4). Abbildung 28 zeigt nämlich wie das prozessnahe Abflussbildungsmodul (hier RGM-PRO) sowohl die zeitliche als auch die volumetrische Komponente der Ganglinien, sowohl im steigenden als auch im abfallenden Teil, besser nachbilden konnte als die zwei Modellkonfigurationen von PREVAH (vgl. auch Tab. 6 und 7).

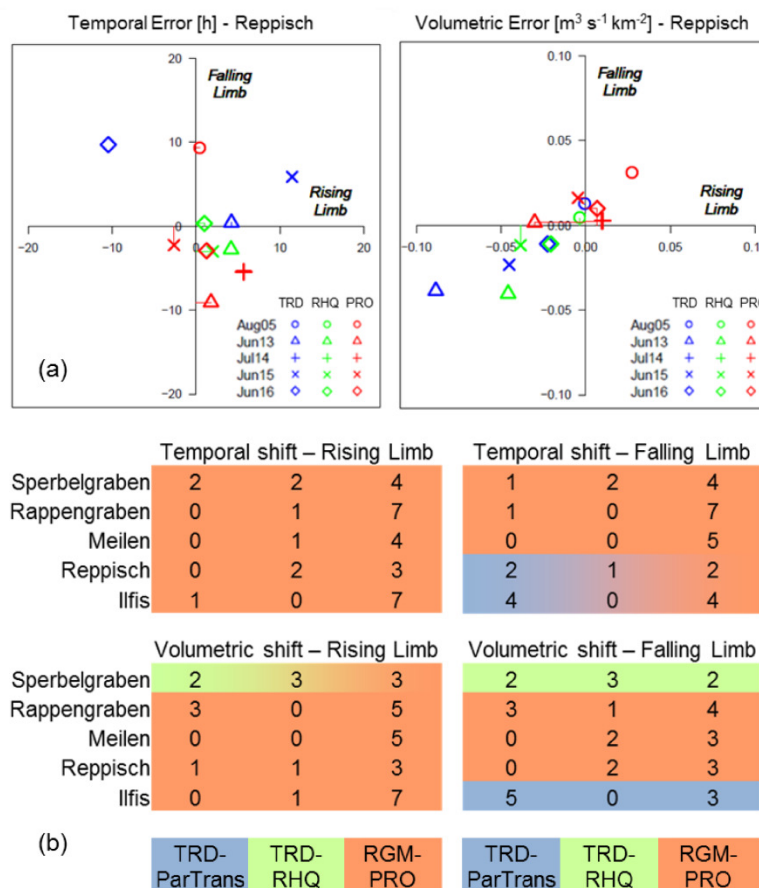


Abb. 28: (a) Zeitliche und volumetrische Abweichung des steigenden bzw. abfallenden Teils der simulierten Ganglinien für das EZG der Reppisch. Jeder Punkt entspricht einem Ereignis, das entweder mit dem traditionellen Modell (blau), mit dem Regionalisierungsverfahren nach Viroli et al. (2009; grün) oder mit dem prozessnahen Modell (rot) berechnet wurde. Eine Linie zeigt, für jedes Ereignis, welche Methode zum besten Simulationsergebnis führt. (b) Ergebnisse aus der Anwendung des Series-Distance-Ansatzes (Ehret and Zehe, 2011) auf die untersuchten EZG. Für jedes Ereignis wird ein Punkt derjenigen Modellkonfiguration zugewiesen, die die beste Leistung erreicht. Die verschiedenen Farben im Hintergrund stellen die beste Modellkonfiguration für jedes EZG dar. Abbildung aus Antonetti et al. (2017).

5 Schlussfolgerungen

Am Ende dieser Studie stellt sich die Frage, welche Ziele erreicht werden konnten, wo es Verbesserungspotenzial gibt und wie diese Verbesserungen erreicht werden könnten. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Güte des DRP-PREVAH resp. des a priori-parametrisierten Abflussbildungsmoduls

- Das prozessnahe, a priori-parametrisierte Abflussbildungsmodul konnte erfolgreich anhand von EZG mit zuverlässigen Niederschlags- und Abflussdaten eingesetzt werden (Fallstudie 1). Gerade weil in diesem Fall keinerlei Zweifel über Inputdaten bestehen und die Gebiete derart unterschiedlich auf Niederschläge reagieren, weiss der angewendete Ansatz zu überzeugen.
- Für das Modell wurden flächendeckend in der Schweiz verfügbare, auf Radar beruhende Niederschlagsdaten von CombiPrecip verwendet (Fallstudie 2 und 3), die aber auch Unsicherheiten aufweisen. Dabei erreichte das prozessnahe Modul eine durchschnittlich bessere Leistung als traditionelle Regionalisierungsansätze von PREVAH. So wurden die gemessenen Ganglinien mit DRP-PREVAH nach Verlauf und Volumen besser nachgebildet.
- Die Volumen werden durch das DRP-PREVAH meist gut abgebildet, während die berechneten Abflussanstiege vor allem beim Hauptereignis zu langsam und die Abflussspitzen zu klein sind. Der verhaltene Anstieg ist möglicherweise auch der Grund, weshalb die Abflussspitzen unterschätzt werden.
- Es gibt systematische Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen an bestimmten Pegeln (Emme-Eggiwil, Trueb-Trubschachen).
- Der DRP-Ansatz gibt Einblick bezüglich der Abflussreaktion von Teil-EZG und somit in die räumliche Verteilung der Prozesse (Fallstudie 3), dies erlaubt hydrologische Plausibilisierungen.
- Niederschläge, die kurz vor den eigentlichen Hochwassern fallen, führen zu einer verfrühten Abflussbildung, die so an den Pegeln z. T. nicht beobachtet wird.
- Der auf Berechnungsversuchen basierte Ansatz war in einer ersten Anwendung nicht erfolgreich. Die berechneten Abflussspitzen wurden deutlich unterschätzt.
- Mit der Verwendung von CombiPrecip wurde das neue Modul mit denjenigen Inputdaten getestet, die auch der Vorhersage und für Nachrechnungen schweizweit zur Verfügung stehen. Die Qualität dieser Daten zeigten offensichtliche Einschränkungen (z.B. 1h-Werte) und auch räumliche Defizite (v.a. in den Voralpen). Dank geringem Aufwand bei der Bereitstellung der Inputdaten CombiPrecip konnten aber auf diese Weise enorm viele Berechnungen durchgeführt werden und so verschiedenste Modell-Konfigurationen getestet werden.

Verbesserungspotential

- Die vereinfachte konzeptionelle Darstellung der Abflusskonzentration des unterirdischen Abflusses im Modell (mit einer einzigen Gebietsspeicherkonstante - GS1H) ergibt eine verlangsamte Reaktion und führt sehr wahrscheinlich zur Unterschätzung der Abflussspitzen. Diese Generalisierung sieht vor, dass in EZG von 0.3 – 3.5 km² die unterirdische Abflusskonzentration mit derselben Funktion behandelt wird. Eine Berücksichtigung beispielsweise der Grösse der Teil-EZG, der Gewässerdichte und evtl. weiterer Parameter könnte dieses Defizit beheben.
- Die verfrühte Abflussbildung im Vorfeld von Hauptereignissen liegt vermutlich an den bislang unberücksichtigten Interzeptionsverlusten.

- Eine höhere zeitliche Auflösung (z.B. 10 Minuten) bei den Inputdaten könnte die Nachrechnung von plötzlich stark ansteigenden Ganglinien deutlich verbessern.
- Eine explizite Berücksichtigung von Abflussbildungsprozessen (DRP) statt Abflusstypen im prozessnahen Modell würde die Abbildung der Entwässerungsprozesse im Modell verbessern. Da jedoch die Abflusstypen mit ihren Reaktionskurven eine Generalisierung darstellen, würde mit der individuellen Behandlung jedes Prozesses die Anzahl an Parametern stark zunehmen und die Gefahr von „overfitting“ erhöhen.
- Da die Teil-EZG der Emme bis Emmenmatt ziemlich ähnlich auf starke Niederschläge reagieren, kam der Mehrwert des vorliegenden prozessnahen Ansatzes nur begrenzt zur Geltung. Der Wert dieses Ansatzes dürfte sich erst in stark unterschiedlich reagierenden Gebieten zeigen, wie beispielsweise bei Isert und Ror.
- Die Ursachen für die systematischen Abweichungen (gemessen und berechnet) an den (hydraulisch ungeprüften) Pegelstationen (Emme bei Eggwil und Trueb bei Trubschachen) können im Augenblick nicht genau identifiziert werden. Daher ist es sinnvoll, Verbesserungsarbeiten am DRP-PREVAH in Gebieten vorzunehmen, wo verlässliche Niederschlags- und Abflussdaten für den Hochwasserfall verfügbar sind. Nur so kann der Nutzen und die tatsächliche Leistungsfähigkeit des Modells zweifelsfrei evaluiert werden.
- Der auf Beregnungsversuchen basierte Ansatz war nicht erfolgreich. Dabei zeigte sich, dass bilanzierte Wasserflüsse wie die Tiefensickerung nicht 1 : 1 in Modelle übertragen werden können. Dem Unterschied bei Intensität und Skale muss Rechnung getragen werden. Im vorliegenden Fall müssten die bei einer Beregnungsintensität von 100 mm/h auftretenden Perkulationsraten für Modellrechnungen mit Landregen wesentlich abgemindert werden. Dieser Schritt dürfte sich lohnen, denn damit dürften wesentlich bessere Resultate erzielt werden.

Relevanz der Ergebnisse

Die im vorliegenden Bericht beschriebenen Ansätze stellen einen erfolgreichen Versuch dar, qualitatives und detailliertes Verständnis über dominante Abflussbildungsprozesse im Rahmen eines konzeptionellen hydrologischen Modells anzuwenden. Die Verwendung von Informationen über die räumliche Verteilung dominanter Abflussbildungsprozesse ermöglicht dem Modell, „aus den richtigen Gründen“ zu einer guten Übereinstimmung von gerechneten und gemessenen Abflüssen in EZG zu gelangen (Klemes, 1986; Kirchner, 2006). Das prozessnahe Abflussbildungsmodul verzichtet auf die sonst standardmässige Kalibrierung. Für alle Parameter werden a priori enge Bereiche festgelegt. Damit kann dieser Ansatz beliebig auf ungemessene EZG angewendet werden, wo Abflussprozesskarten und gegitterte Niederschlagsdaten und das Bodenfeuchtedefizit zum Berechnungsstart vorhanden sind.

Dieser Ansatz hat weiteres Potenzial. Eine realistischere räumliche Verteilung der Abflussbildungsprozesse kann Untersuchungen verbessern, die auf eine realistische Abbildung der auftretenden Abflussprozesse angewiesen sind. Beispielsweise könnten Untersuchungen über Pestizidtransport und -Ausbreitung von der differenzierten Darstellung der Abflussbildungsprozesse profitieren.

Wie in der zweiten Fallstudie gezeigt, kann das hier entwickelte Abflussbildungsmodul auch als Untersuchungswerkzeug verwendet werden, um Unsicherheitsquellen zu identifizieren. Geht man davon aus, dass die Abflusstypenkarte für ein gewisses EZG die räumliche Prozessverteilung realistisch nachbildet, könnten eventuelle Abweichungen zwischen gemessenem und simuliertem Abfluss entweder mit Unsicherheiten in den Niederschlags-Input-Daten oder in den Abflussmessungen erklärt werden.

Literaturverzeichnis

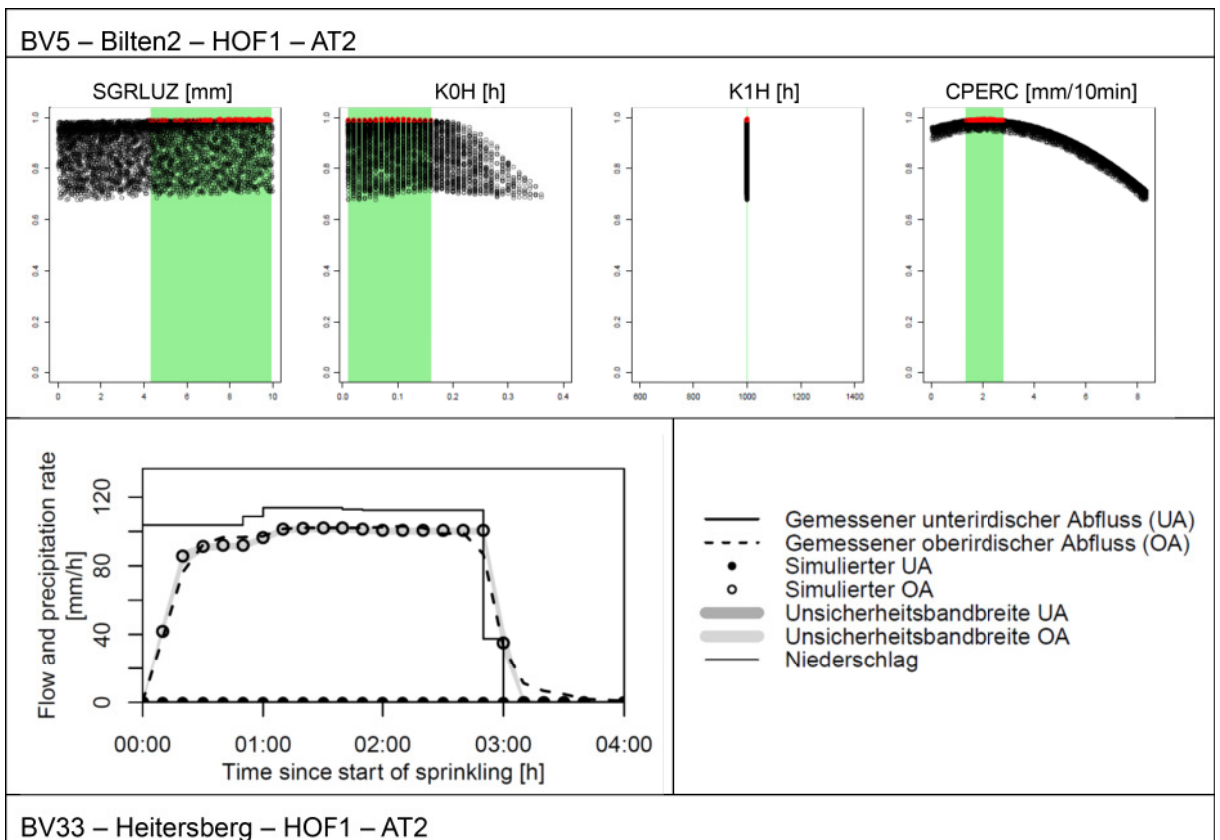
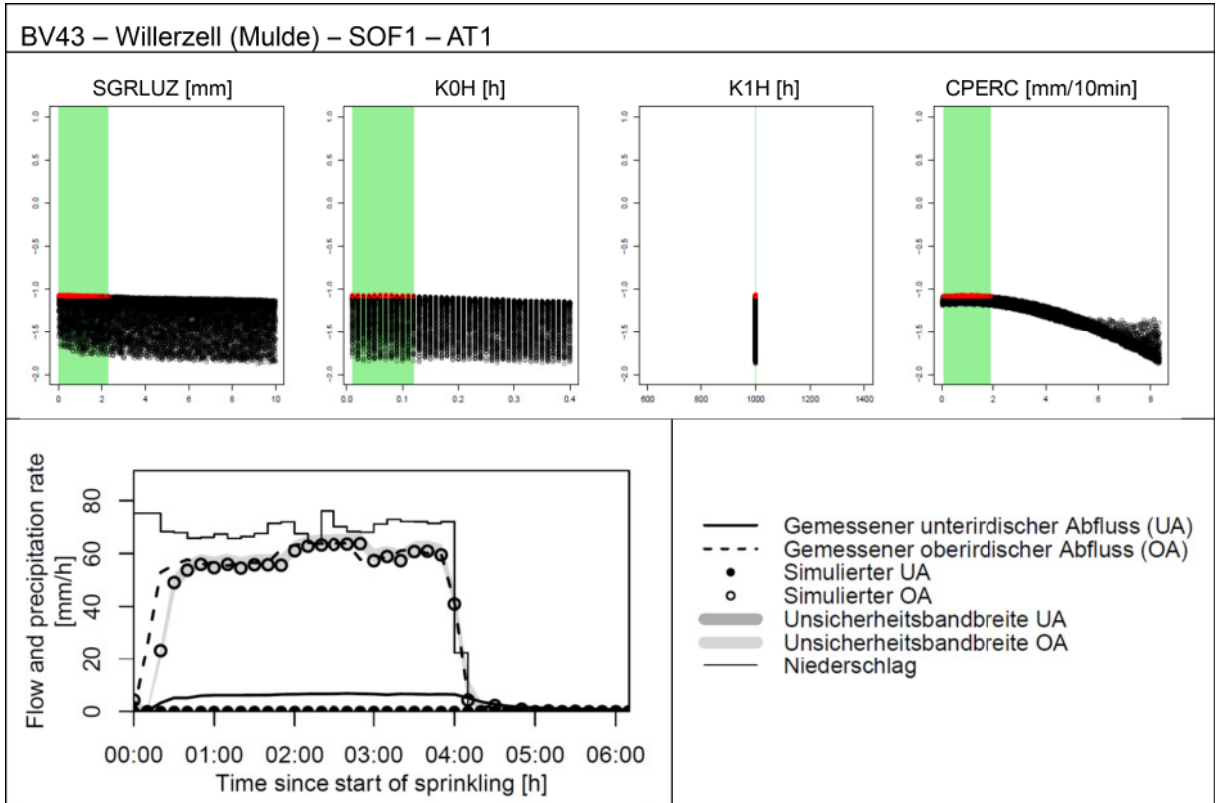
- Antonetti, M., Buss, R., Scherrer, S., Margreth, M., and Zappa, M.. 2016a. Mapping dominant runoff processes: an evaluation of different approaches using similarity measures and synthetic runoff simulations. *Hydrology and Earth System Sciences* 20 (7): 2929–2945 doi: 10.5194/hess-20-2929-2016
- Antonetti, M., Scherrer, S., Kienzler, P., Margreth, M., and Zappa, M., 2016b. Überprüfung von einem prozessnahen Abflussbildungsmodul auf der Hangskale und für klein- und mesoskalige Gebiete. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*. 36.16: 63-74.
- Antonetti M., Scherrer S, Kienzler P., Margreth M, Zappa M. Process-based hydrological modelling: The potential of a bottom-up approach for runoff predictions in ungauged catchments. *Hydrological Processes*. 2017a;31:2902–2920. doi:10.1002/hyp.11232
- Antonetti M., Zappa M. How can expert knowledge increase the realism of conceptual hydrological models? A case study in the Swiss Pre-Alps. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*. doi:10.5194/hess-2017-322
- Blöschl, G., Komma, J., Hasenauer, S.. 2009. Hydrological downscaling of soil moisture. Final Report to the H-SAF (Hydrology Satellite Application Facility) via the Austrian Central Institute for Meteorology and Geodynamics (ZAMG).
- Carver, M., Weiler, M., Scheffler, C., Rosin, C., 2009. Development and application of a peak-flow hazard model for the Fraser basin (British Columbia). MPBI Project 7.29. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Canada.
- Ehret, U. and Zehe, E., 2011. Series distance – An intuitive metric to quantify hydrograph similarity in terms of occurrence, amplitude and timing of hydrological events, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 877–896, doi:10.5194/hess-15-877-2011.
- Gharari, S., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Gao, H., and Savenije, H. H. G., 2014. Using expert knowledge to increase realism in environmental system models can dramatically reduce the need for calibration, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4839–4859, doi:10.5194/hess-18-4839-2014.
- Gupta, H. V., H. Kling, K. K. Yilmaz, G. F. Martinez, 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377, 80-91.
- Hantke, R. und Mitarbeiter, 1967. Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete 1:50'000.
- Horat, C. M. 2017: Operational Applications of a Process-based Runoff Generation Module in the Emme and Ticino Areas. Masterarbeit ETH Zürich / WSL Birmensdorf.
- Kienzler, P., 2007. Experimental study of subsurface stormflow formation. Diss ETH Nr. 17330.
- Kirchner, J. W. 2006. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology, *Water Resour. Res.*, 42.
- Klemes, V., 1986. Delettantism in hydrology: Transition or destiny?, *Water Resour. Res.*, 22, S177–S188.
- Margreth, M., Naef, F., Scherrer, S., 2010. Weiterentwicklung der Abflussprozesskarte Zürich in den Waldgebieten.
- Naef F., Kienzler P., Margreth M., 2007. Analyse Hochwasser 2005, unveröffentlichter Synthesebericht
- Naef, F., Scherrer, S., Thoma, C., Weiler, W., and Fackel, P. , 2000. Die Beurteilung von Einzugsgebieten und ihren Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der land- wirtschaftlichen Nutzung – aufgezeigt an drei Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz, Untersuchung im Auftrag des Landesamts für Wasserwirtschaft, Rheinland Pfalz, Report 003
- Naef, F., Scherrer, S., Zurbrügg, C. (1998): Grosse Hochwasser – unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Blatt 5.7.

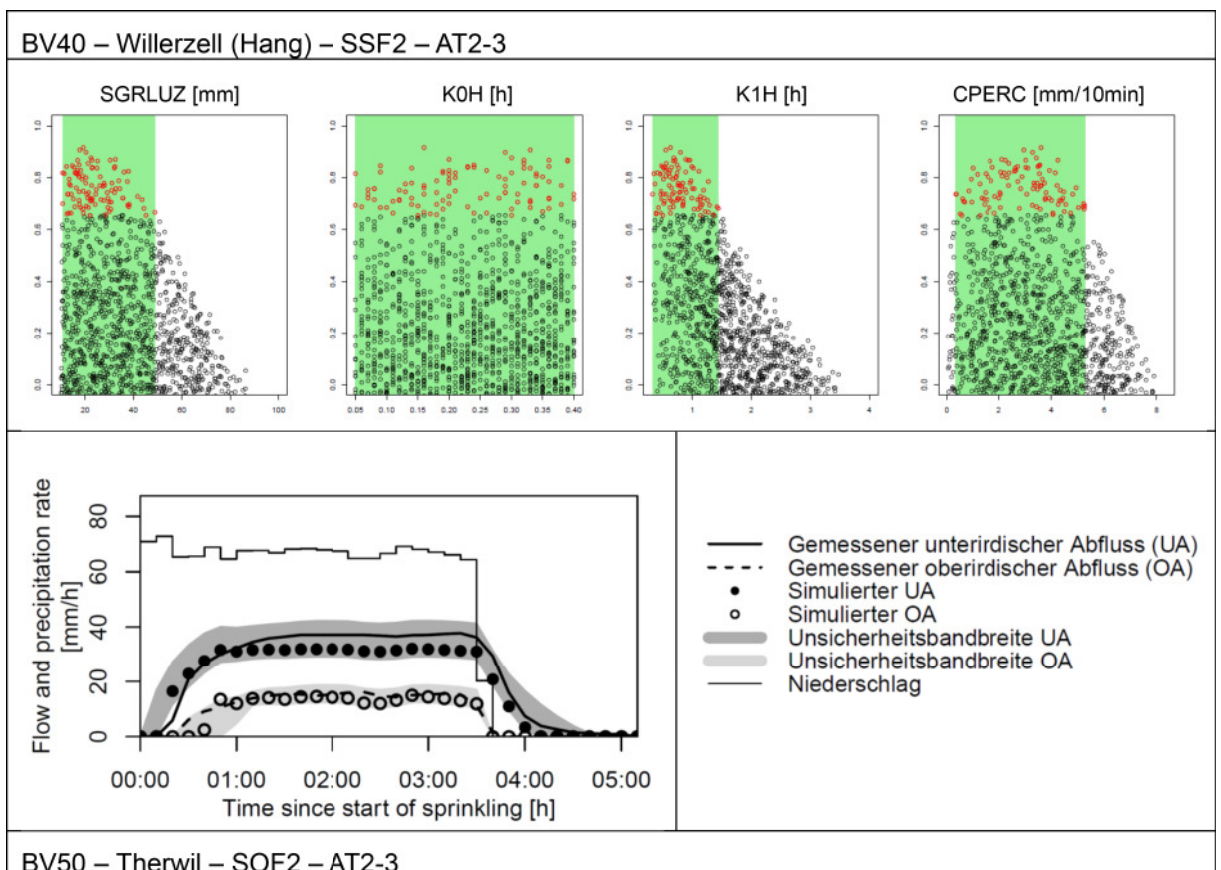
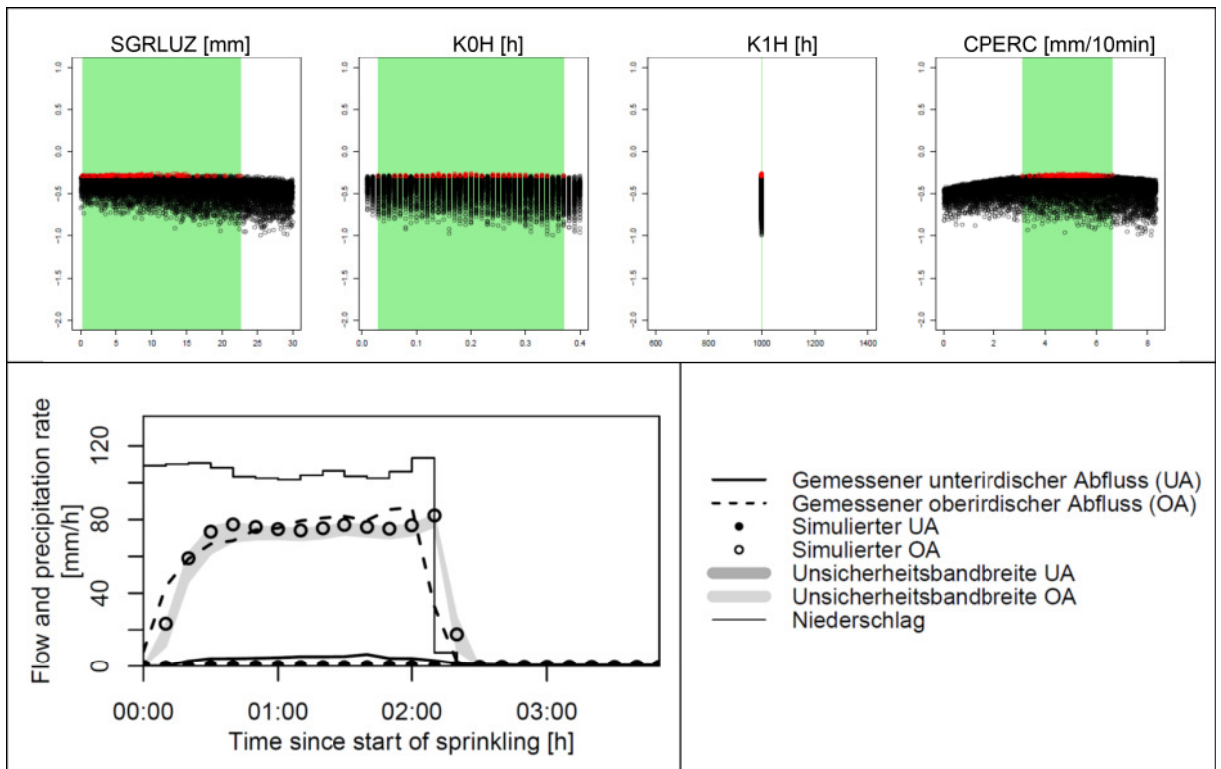
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282-290
- Nijzink, R. C., Samaniego, L., Mai, J., Kumar, R., Thober, S., Zink, M., Schäfer, D., Savenije, H. H. G., and Hrachowitz, M., 2016. The importance of topography-controlled sub-grid process heterogeneity and semi-quantitative prior constraints in distributed hydrological models, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 1151-1176, doi:10.5194/hess-20-1151-2016.
- Scherrer AG., 2006: Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Bericht 18/2006 im Auftrag des LUWG, Mainz.
- Scherrer, S., 1997. Abflussbildung bei Starkniederschlägen. Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 147.
- Scherrer, S., and Naef, F. 2003. A decision scheme to indicate dominant flow processes on temperate grassland. *Hydrological Processes*, 17, 391-401.
- Scherrer, S., Naef, F. (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten - Praxis-hilfe. Hrsg. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation. Berichte des BWG, Serie Wasser – Nr. 4 – Bern 2003. M. Spreafico, R. Weingartner, M. Barben, A. Ryser, S. 25-32.
- Scherrer, S., Naef F., Faeh A. O. and Cordery I., 2007: Formation of runoff at the hill-slope scale during intense precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 2, 907-922.
- Scherrer AG, 2006. Hochwasserabflüsse an der Reppisch. Bericht 06/69.
- Scherrer AG, 2010. Tösstal- Hochwasserabschätzung. Untersuchung zur Herleitung der massgebenden Hochwasserabflüsse entlang der Töss und ausgewählter Seitentäler. Prozesskartierung: ETH Zürich. Auftraggeber AWEL, Wasserbau.
- Scherrer AG & SoilCom, 2010. Beurteilung der Abflussbereitschaft des Einzugsgebiets der Kleinen Emme (Kt. LU) durch automatisierte Kartierung (GIS). Auftraggeber VIF, Kanton Luzern. Bericht: 10/136.
- Scherrer AG & SoilCom, 2012. Massgebende Hochwasserabflüsse an der Ilfis und an den verschiedenen Seitenbächen. Bericht 11/157.
- Scherrer AG, 2014. Hochwasserabflüsse des Dorfbachs Meilen (Kt. Zürich). Bericht 14/190a
- Schmocker-Fackel, P., Naef, F., and Scherrer, S. 2007. Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 2, 891-906.
- Schmocker-Fackel. 2004. A method to delineate runoff processes in a catchment and its implications for runoff simulations. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 156382.
- Schulla, J., 1997. Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Diss. 12018, ETH Zürich, 163 S.
- Sideris, I. V., Gabella, M., Erdin, R., and Germann, U. 2014. Real-time radar-raingauge merging using spatiotemporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Smootenburg, M. 2015. Flood behavior in alpine catchments examined and predicted from dominant runoff processes. Diss. ETH No. 23010.ETHZ. DOI: 10.3929/ethz-a-010553048
- SoilCom & UWE , 2015. Machbarkeitsstudie zur Verknüpfung der feldgestützten Bodenkartierung mit einer GIS-gestützten Modellierung. Im Auftrag des BAFU und von Energie und Umwelt Kanton Luzern.
- Steiner, S., 2007. Emme-Hochwasser - Dokumentation, Typisierung und Analyse der 25 grössten Ereignisse von 1930-2005. Diplomarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern. Publikation Gewässerkunde Nr. 377. 135 S.
- Viviroli D, Zappa M, Gurtz J and Weingartner R. 2009a. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software*. 24(10): 1209–1222. doi:10.1016/j.envsoft.2009.04.001

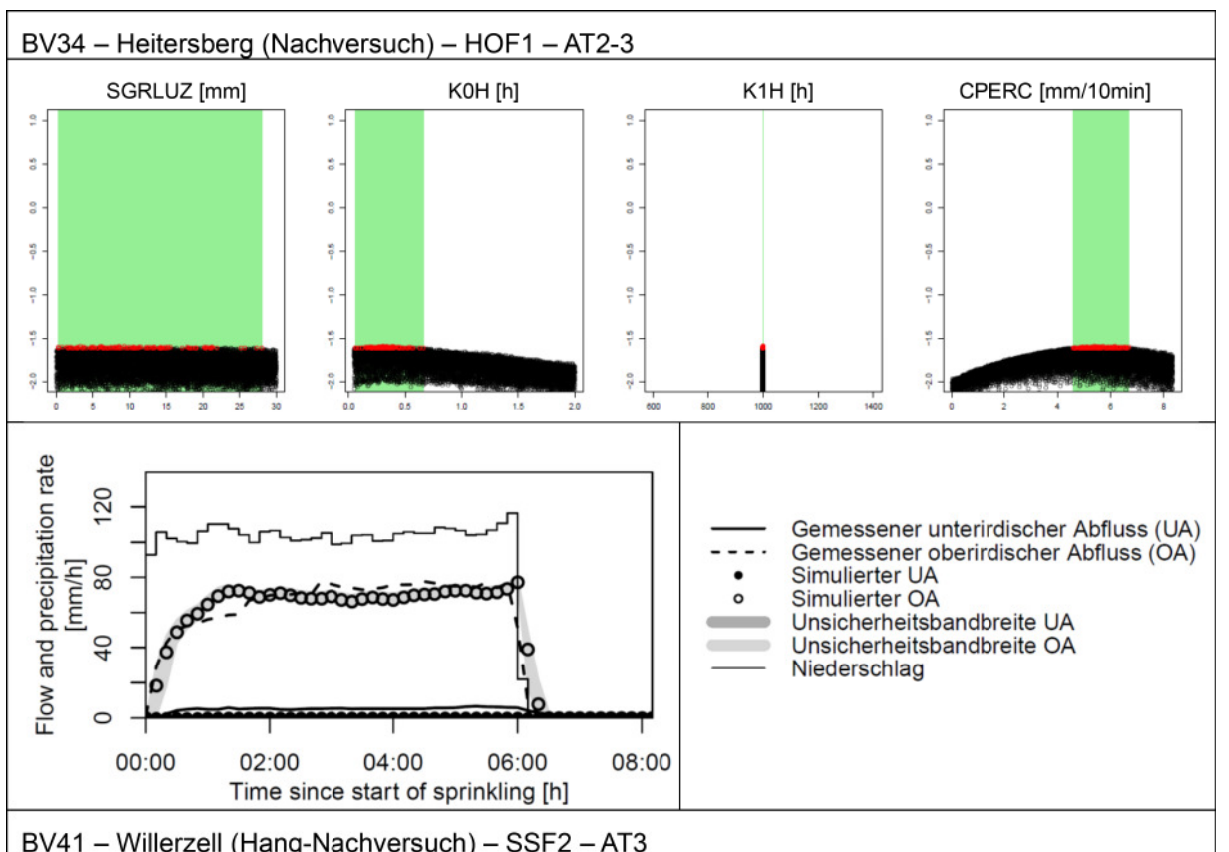
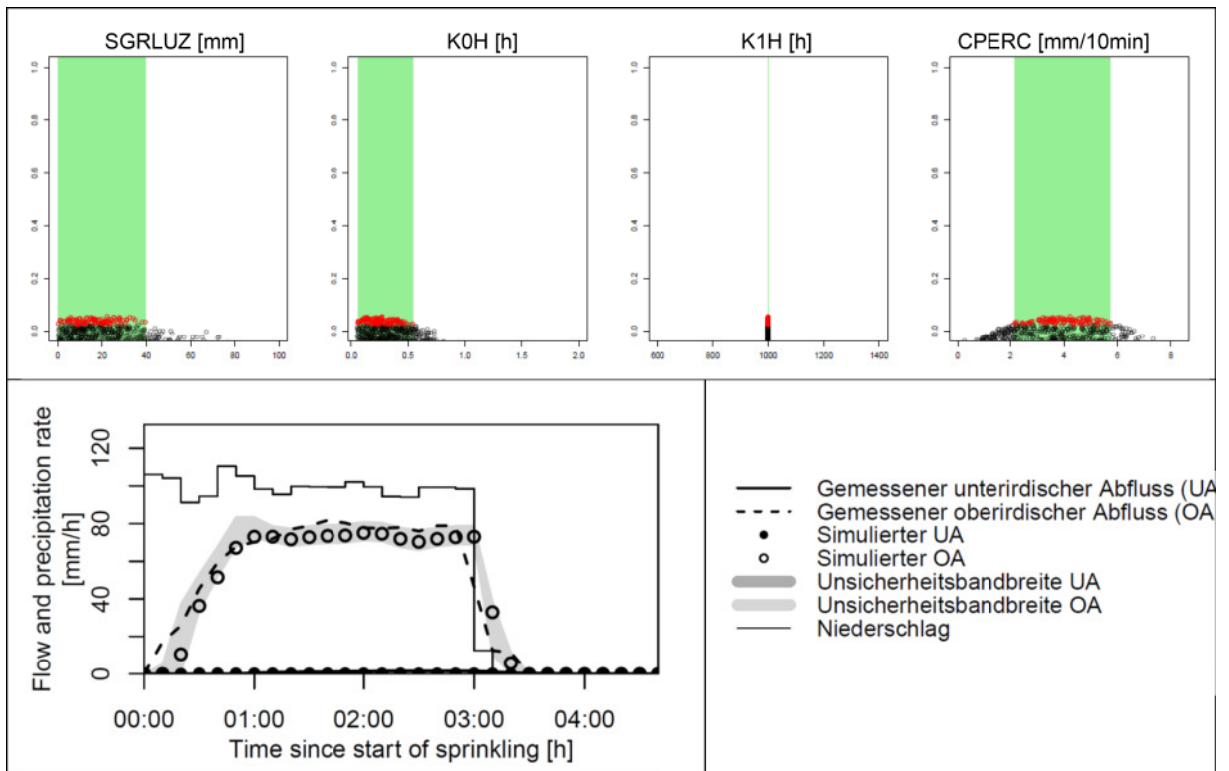
Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J., and Weingartner, R. , 2009b. Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results, *J. Hydrol.*, 377, 208–225, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.022.

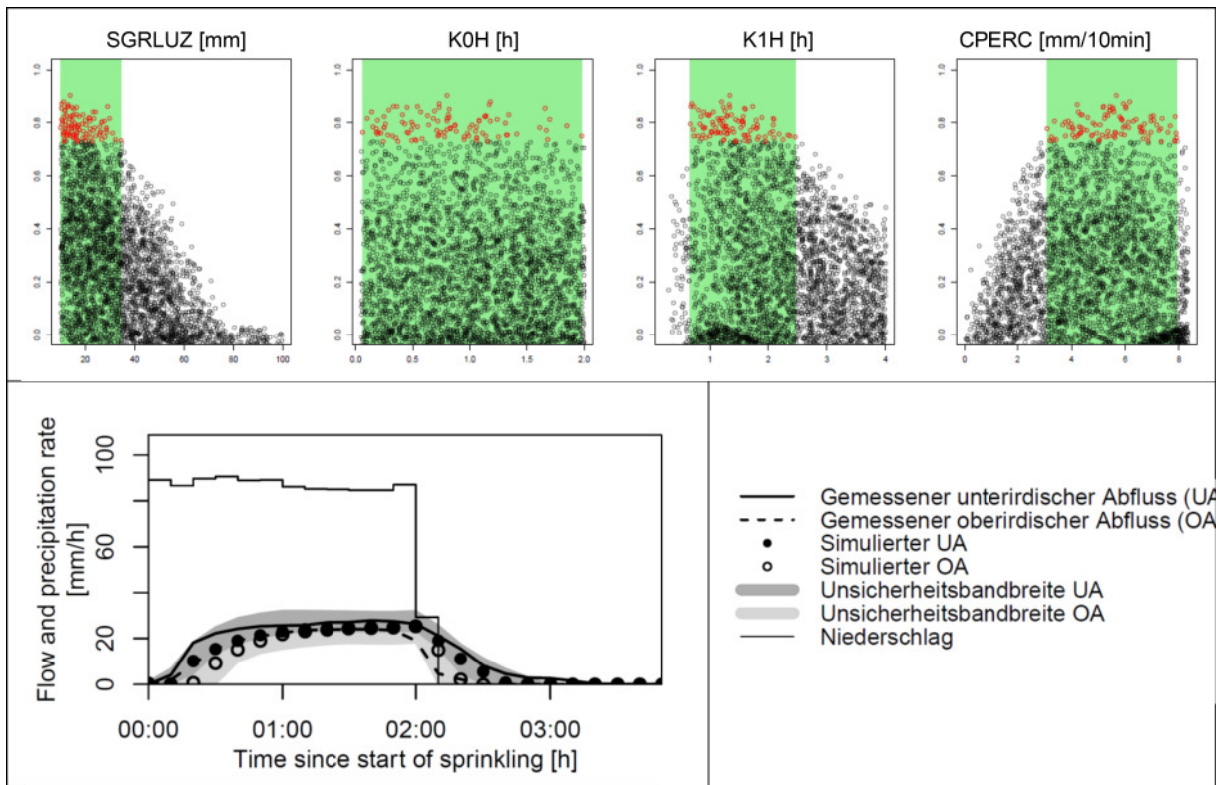
Zingg Th., 1934. Geologischer Atlas der Schweiz, Atlasblatt 7 (Blätter 226 Mönchalt Dorf, 228 Wädenswil, 227 Hinwil, 229 Rapperswil). Hrsg. Geologische Kommission.

Anhang A: Optimierte Parameterbereiche gemäss BVO-Strategie

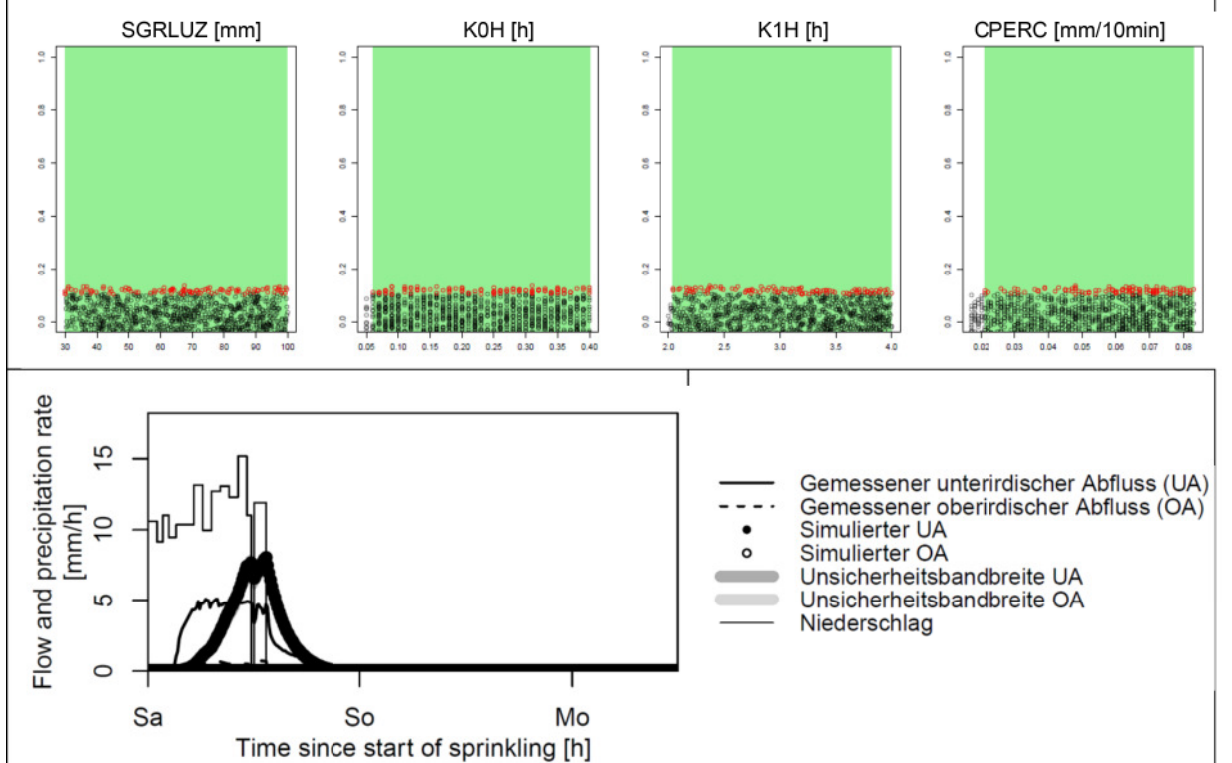




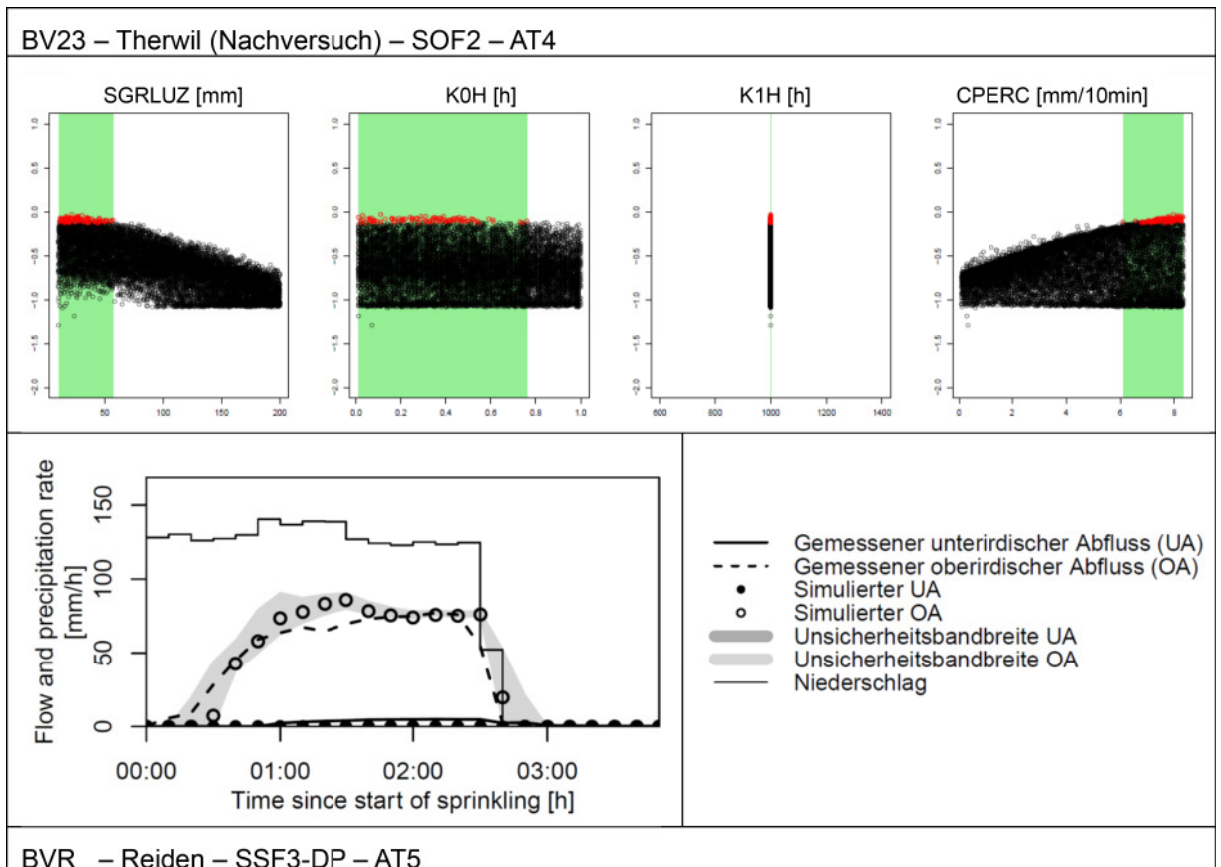
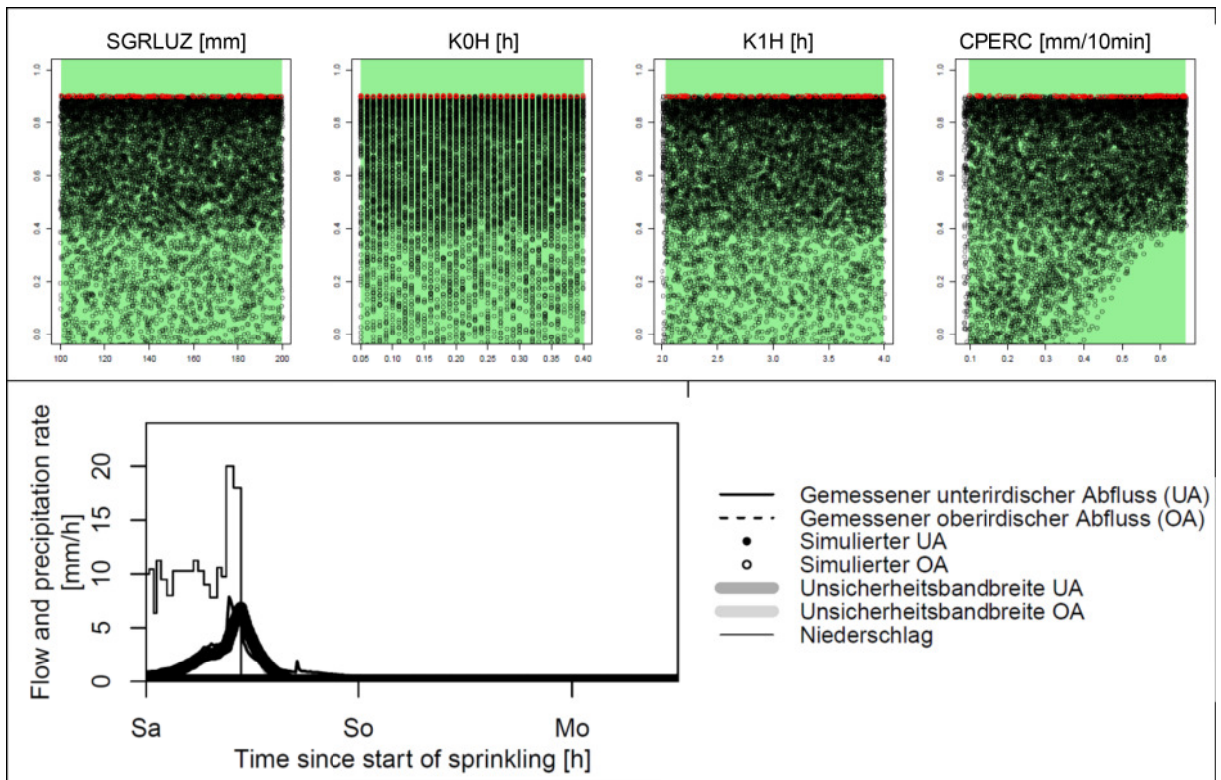


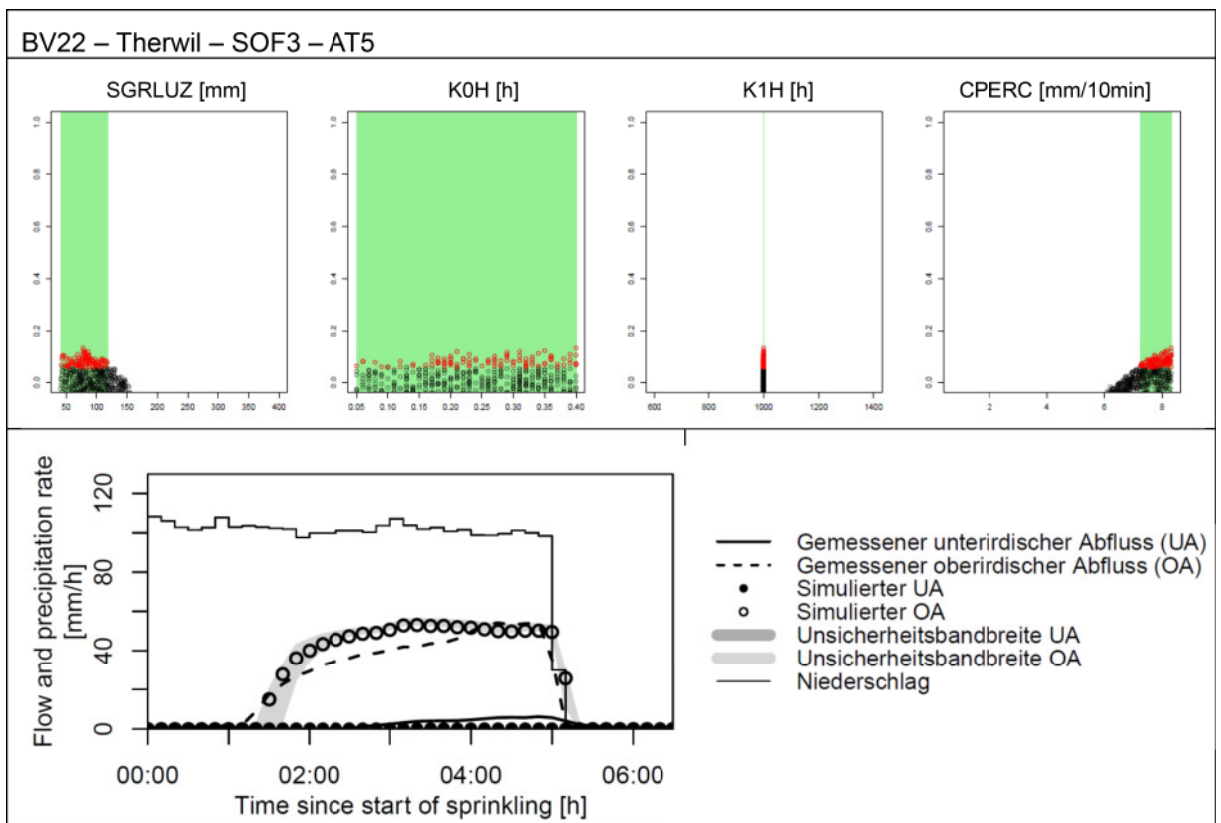
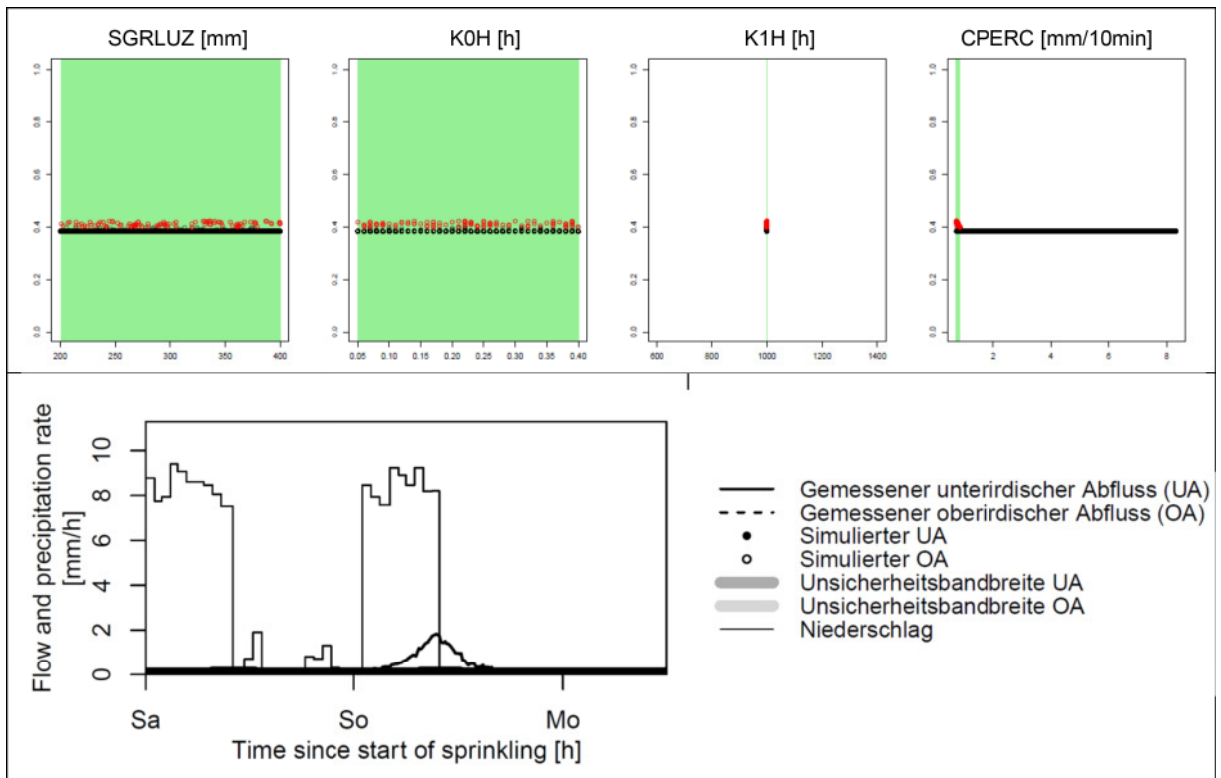


BVL_L – Luthertal – SSF2 – AT3



BVS_S – Schlüssberg – SSF3 – AT4





Anhang B: Optimierte Parameterbereiche gemäss ATO-Strategie

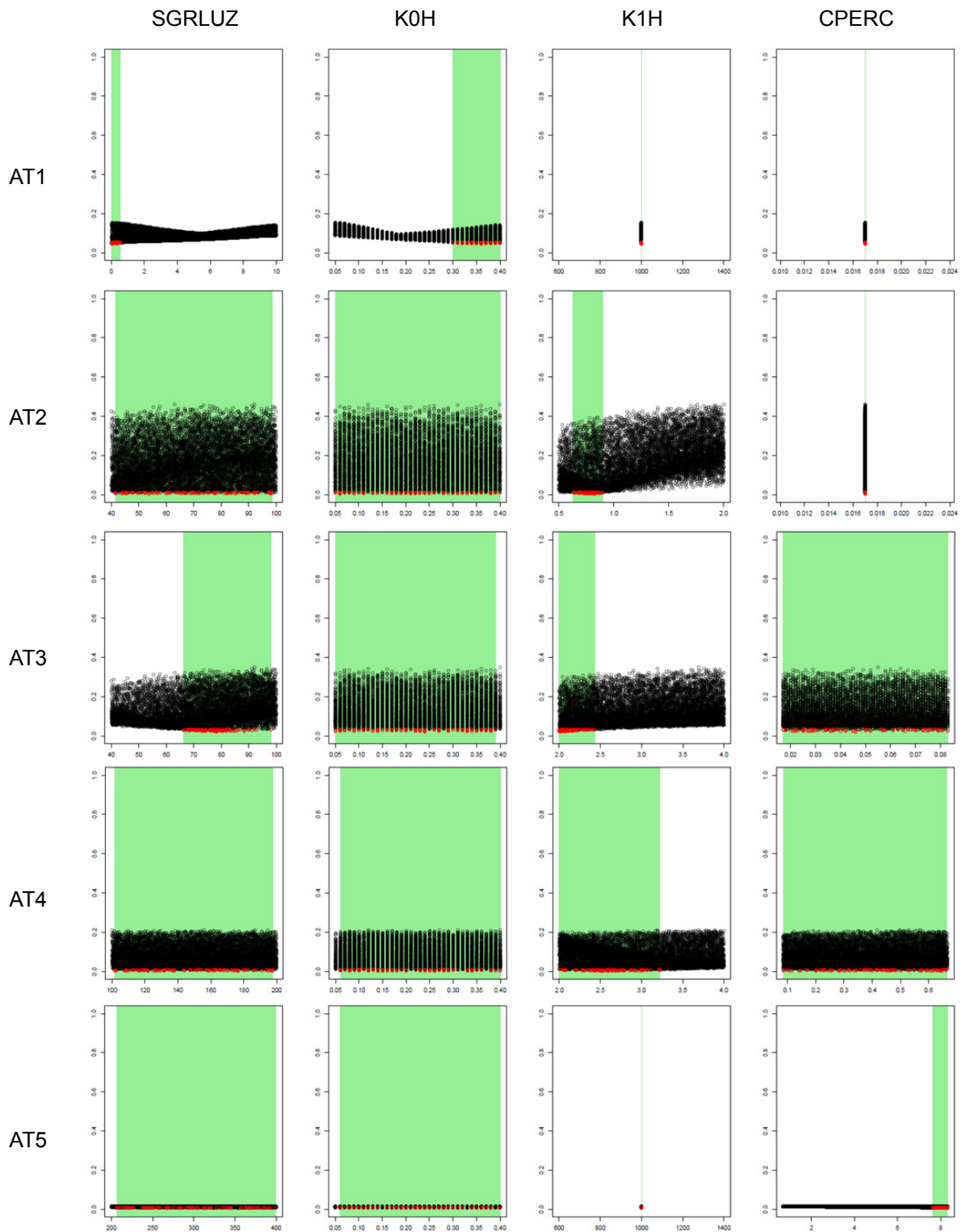


Abb. B1: Parameterbereiche für jeden Abflusstyp (AT1-5). Grün dargestellt sind die optimierten Bereiche nach einer Montecarlo Simulation (10'000 Läufe). Als Zielfunktion wurde der Root Mean Square Error (RMSE) verwendet.

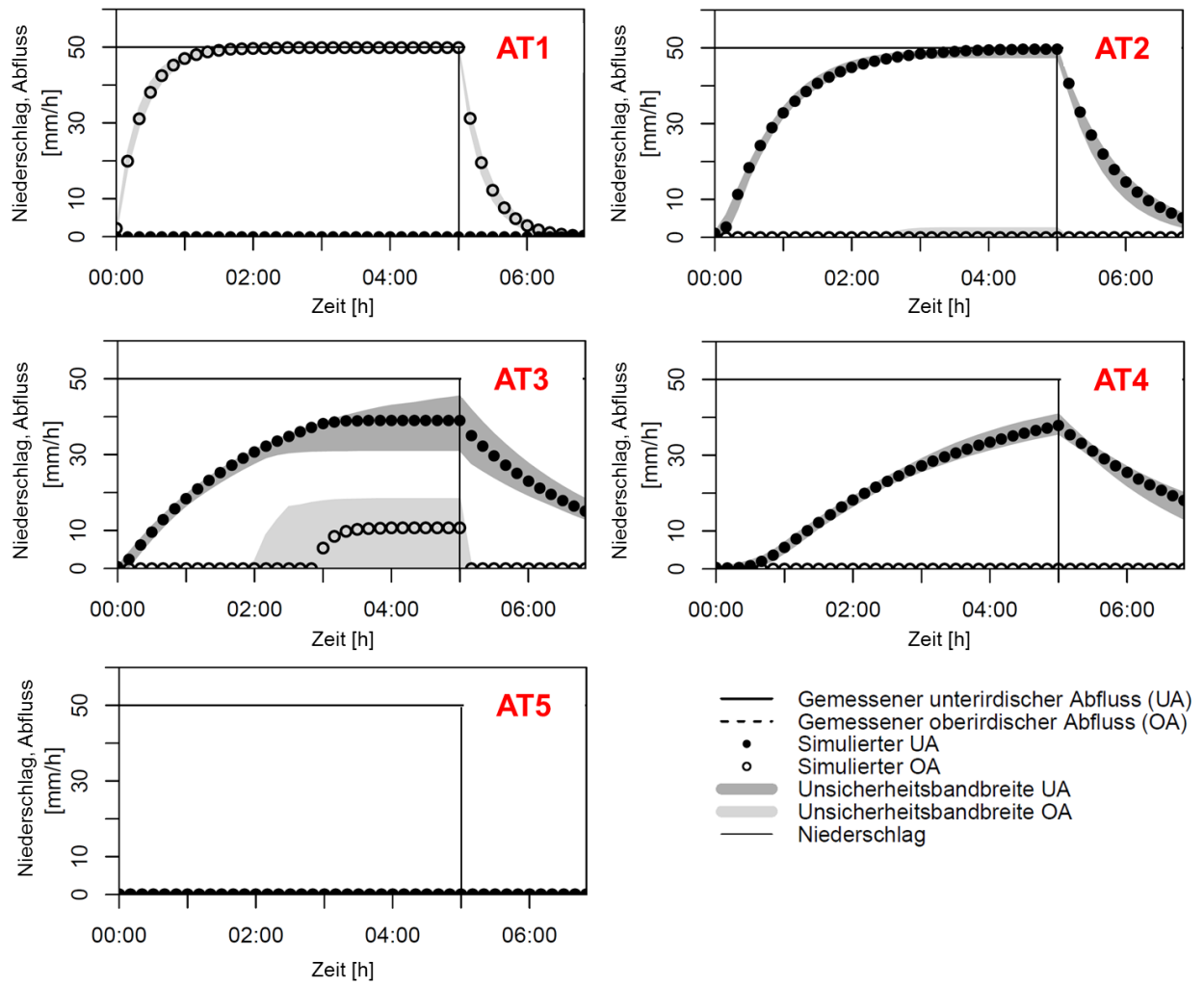


Abb. B2: Nachgerechnete Abflussganglinien für jeden Abflusstyp. Die Unsicherheitsbandbreiten umfassen den simulierten Abfluss der besten 100 Läufe.

Anhang C: Mit den verschiedenen Parametrisierungen simulierte Ganglinien

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Simulationen mit den verschiedenen Parametrisierungsstrategien (vgl. Kapitel 3.4) dargestellt. Da es hier um die Wahl der besten Strategien zur a priori Parametrisierung vom prozessnahen Abflussbildungsmodul geht, wurde nur ein Teil der in Tab. 6 aufgelisteten Ereignisse simuliert, nämlich alle Ereignisse ab 2013 auf das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen Teil-EZG.

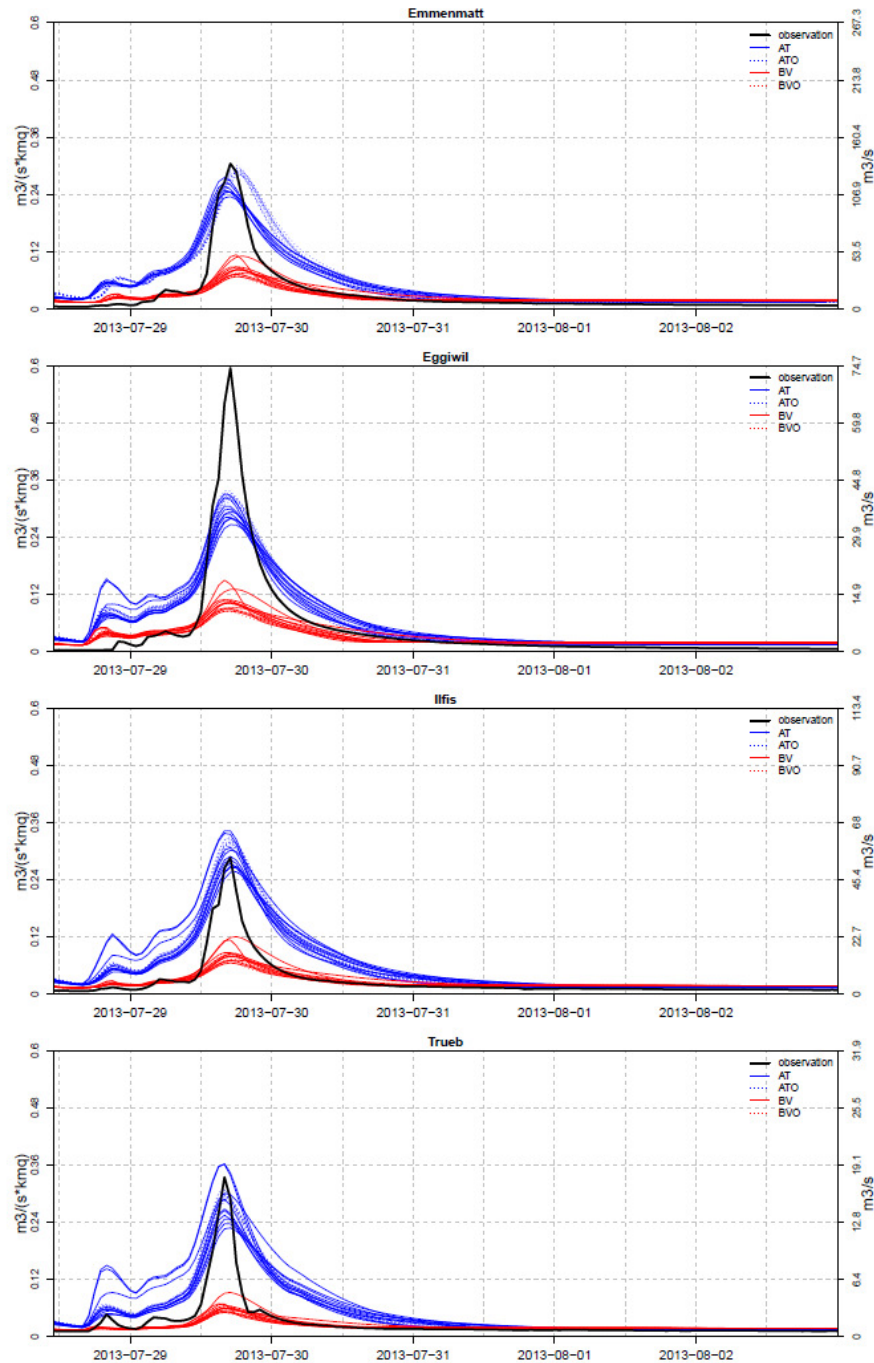


Abb. C1: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und mit den AT-basierten (blau) bzw. BV-basierten (rot) Parametrisierungen simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Gebiete. Kontinuierliche (strichlierte) Linien beziehen sich auf die Varianten ohne (mit) Optimierung.

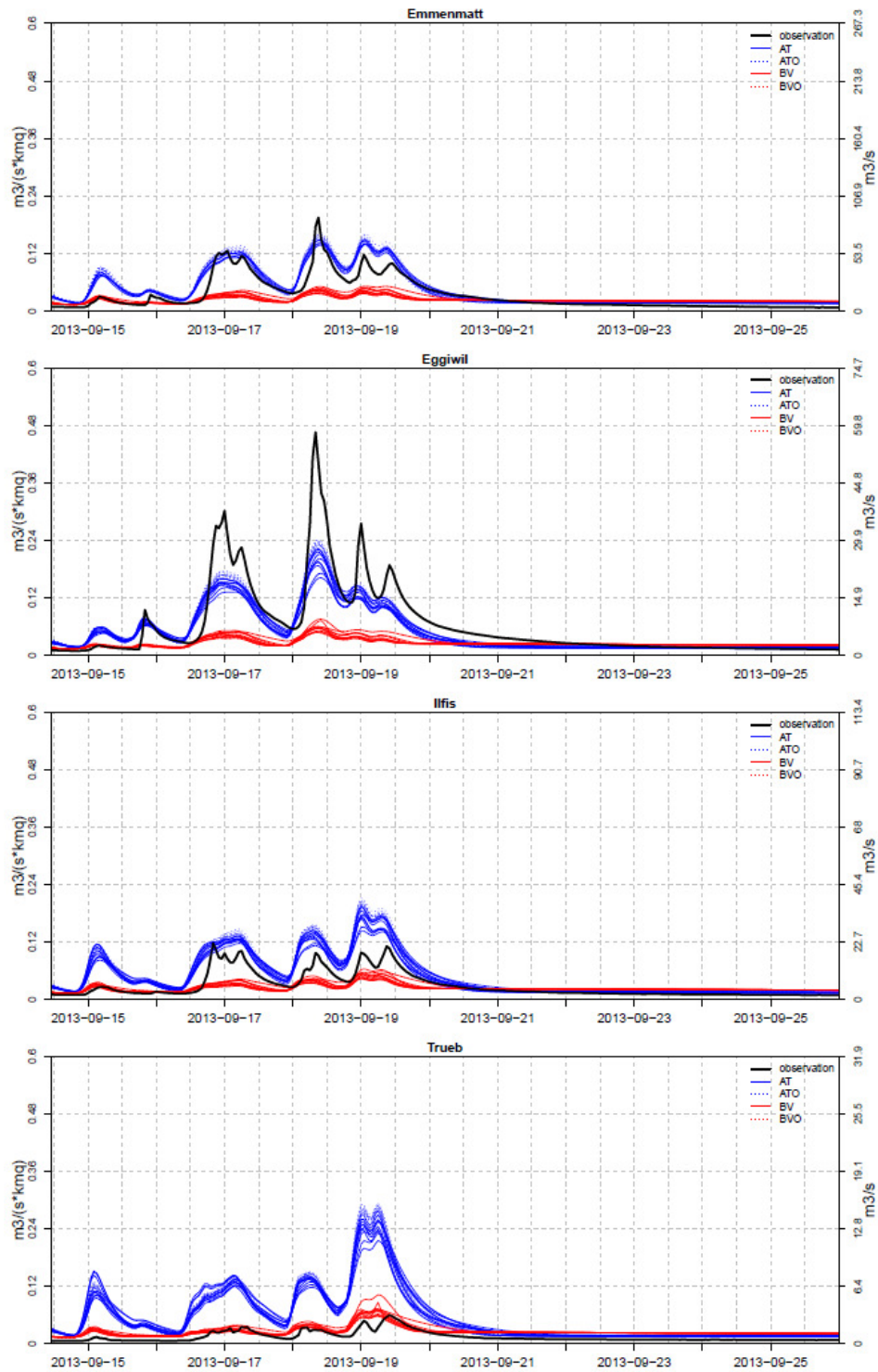


Abb. C2: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und mit den AT-basierten (blau) bzw. BV-basierten (rot) Parametrisierungen simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Gebiete. Kontinuierliche (strichlierte) Linien beziehen sich auf die Varianten ohne (mit) Optimierung.

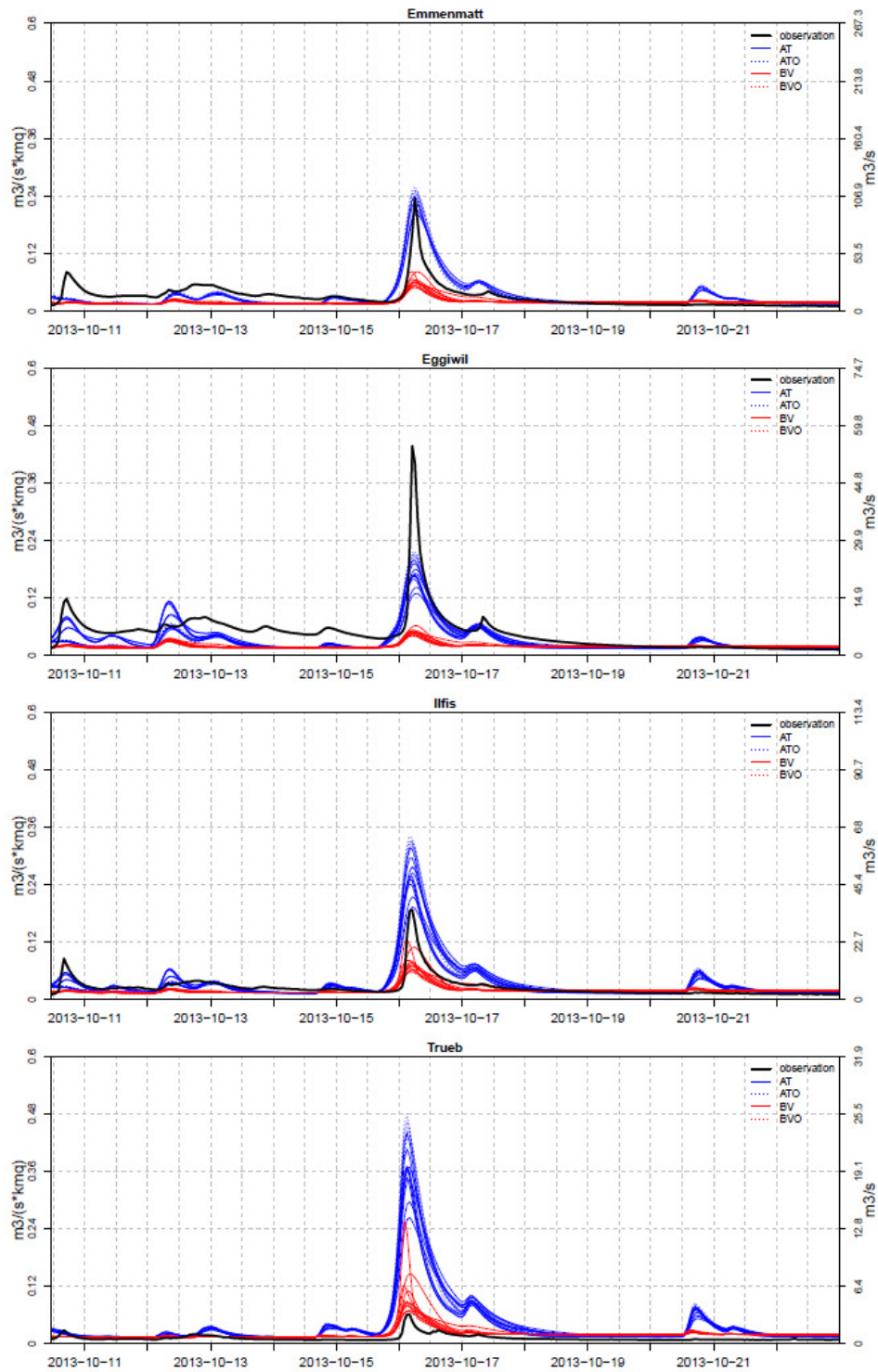


Abb. C3: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und mit den AT-basierten (blau) bzw. BV-basierten (rot) Parametrisierungen simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Gebiete. Kontinuierliche (strichlierte) Linien beziehen sich auf die Varianten ohne (mit) Optimierung.

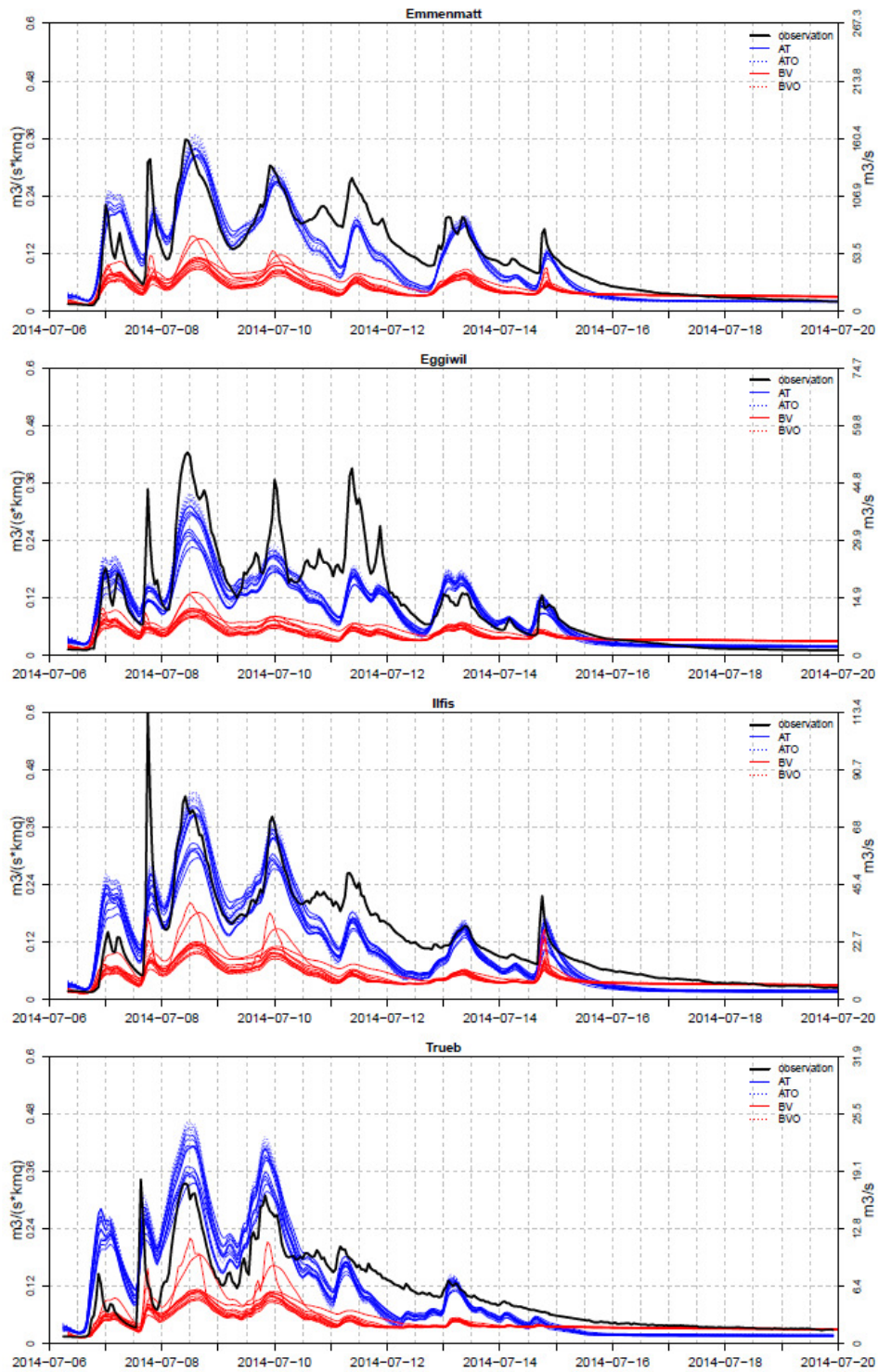


Abb. C4: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und mit den AT-basierten (blau) bzw. BV-basierten (rot) Parametrisierungen simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Gebiete. Kontinuierliche (strichlierte) Linien beziehen sich auf die Varianten ohne (mit) Optimierung.

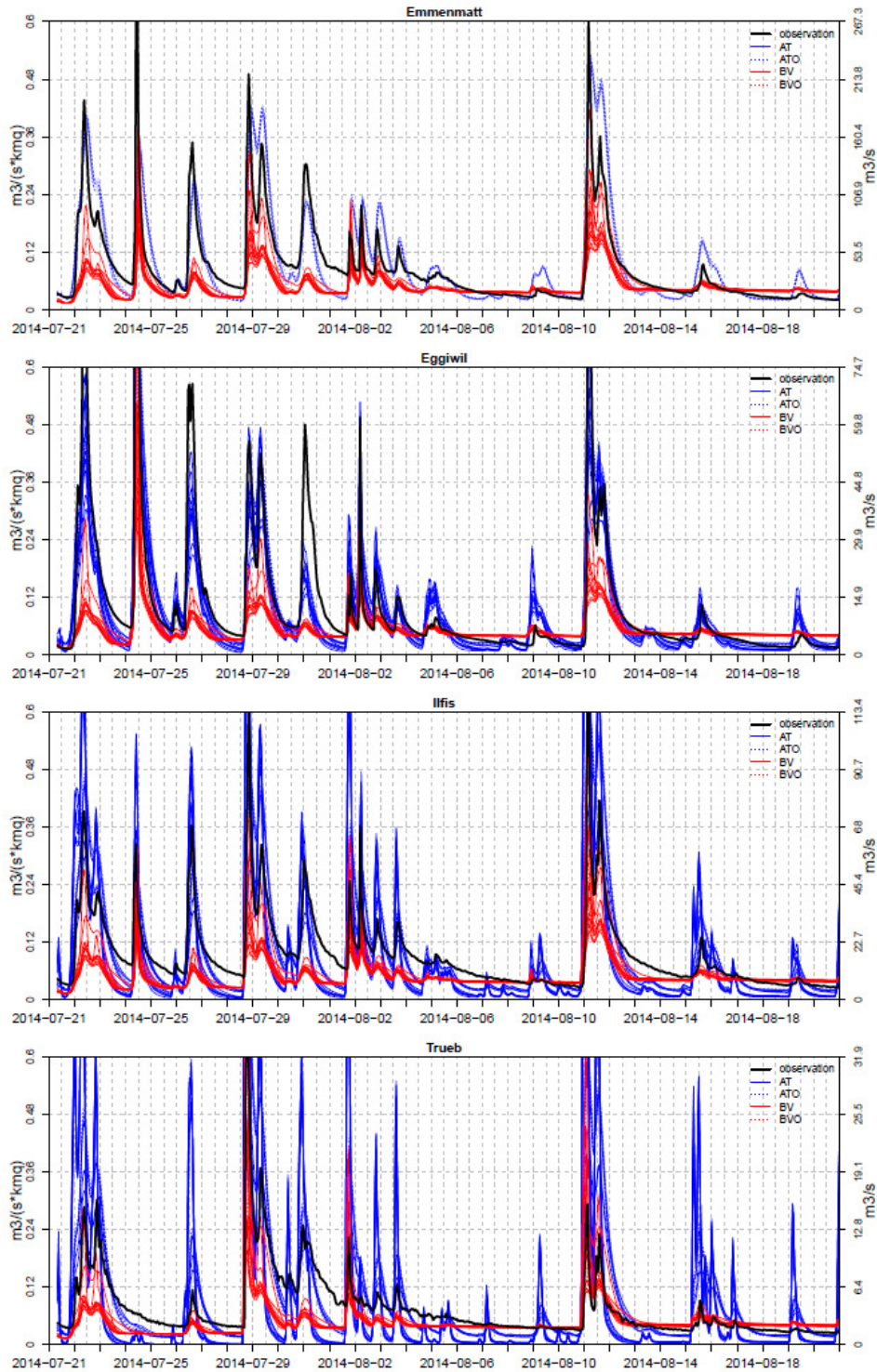


Abb. C5: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und mit den AT-basierten (blau) bzw. BV-basierten (rot) Parametrisierungen simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Gebiete. Kontinuierliche (strichlierte) Linien beziehen sich auf die Varianten ohne (mit) Optimierung.

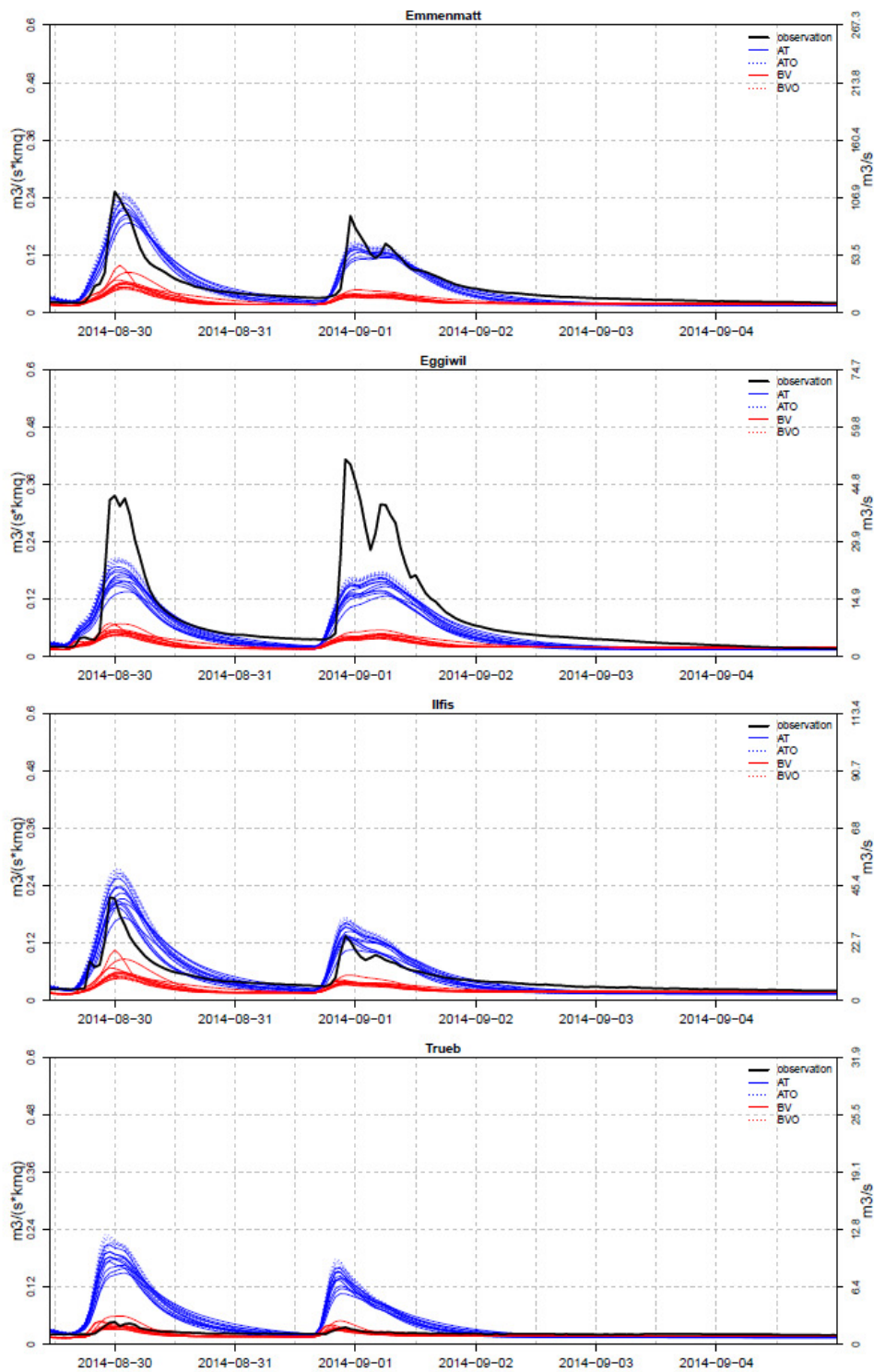


Abb. C6: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und mit den AT-basierten (blau) bzw. BV-basierten (rot) Parametrisierungen simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Gebiete. Kontinuierliche (strichlierte) Linien beziehen sich auf die Varianten ohne (mit) Optimierung.

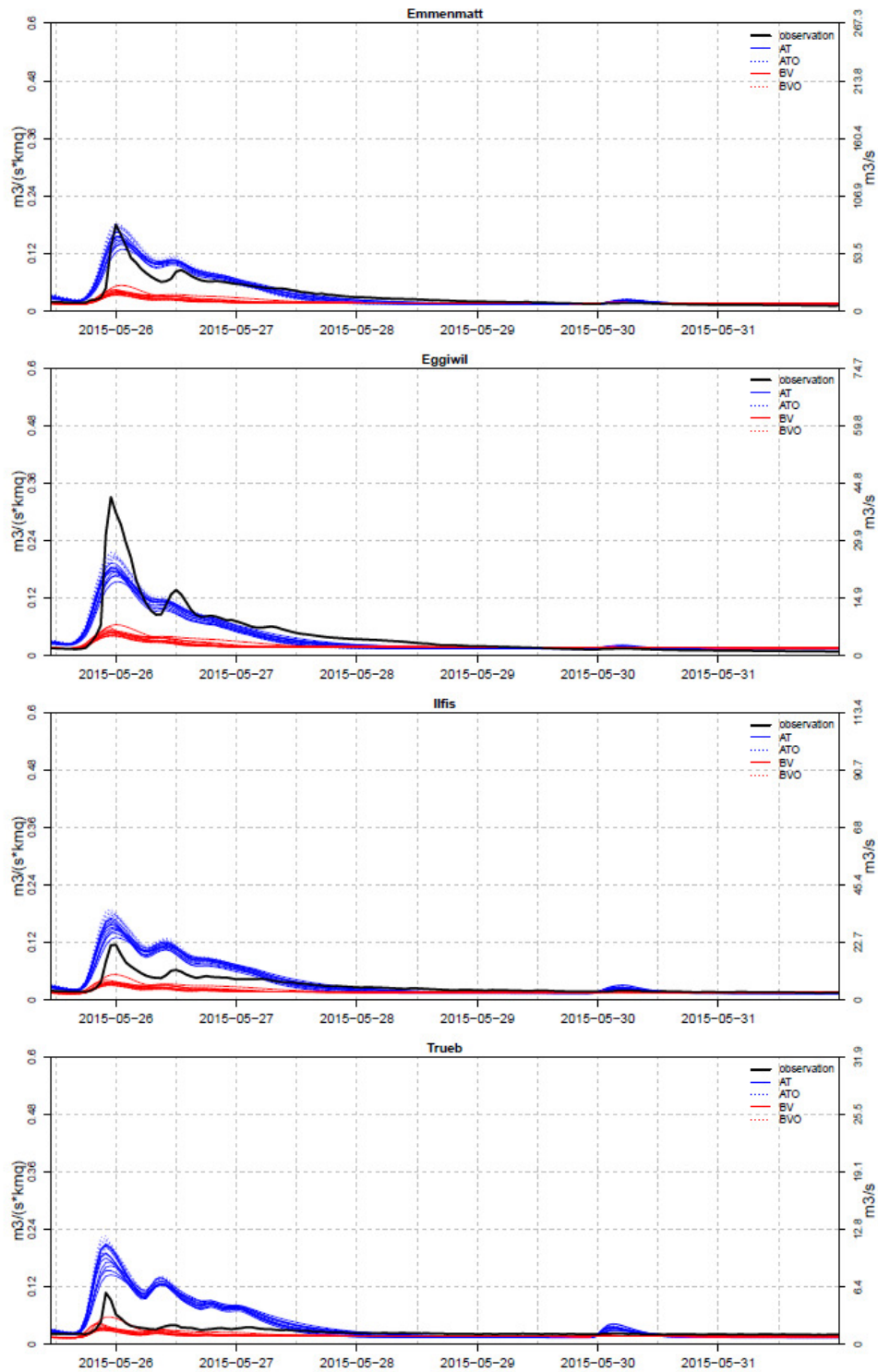


Abb. C7: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und mit den AT-basierten (blau) bzw. BV-basierten (rot) Parametrisierungen simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Gebiete. Kontinuierliche (strichlierte) Linien beziehen sich auf die Varianten ohne (mit) Optimierung.

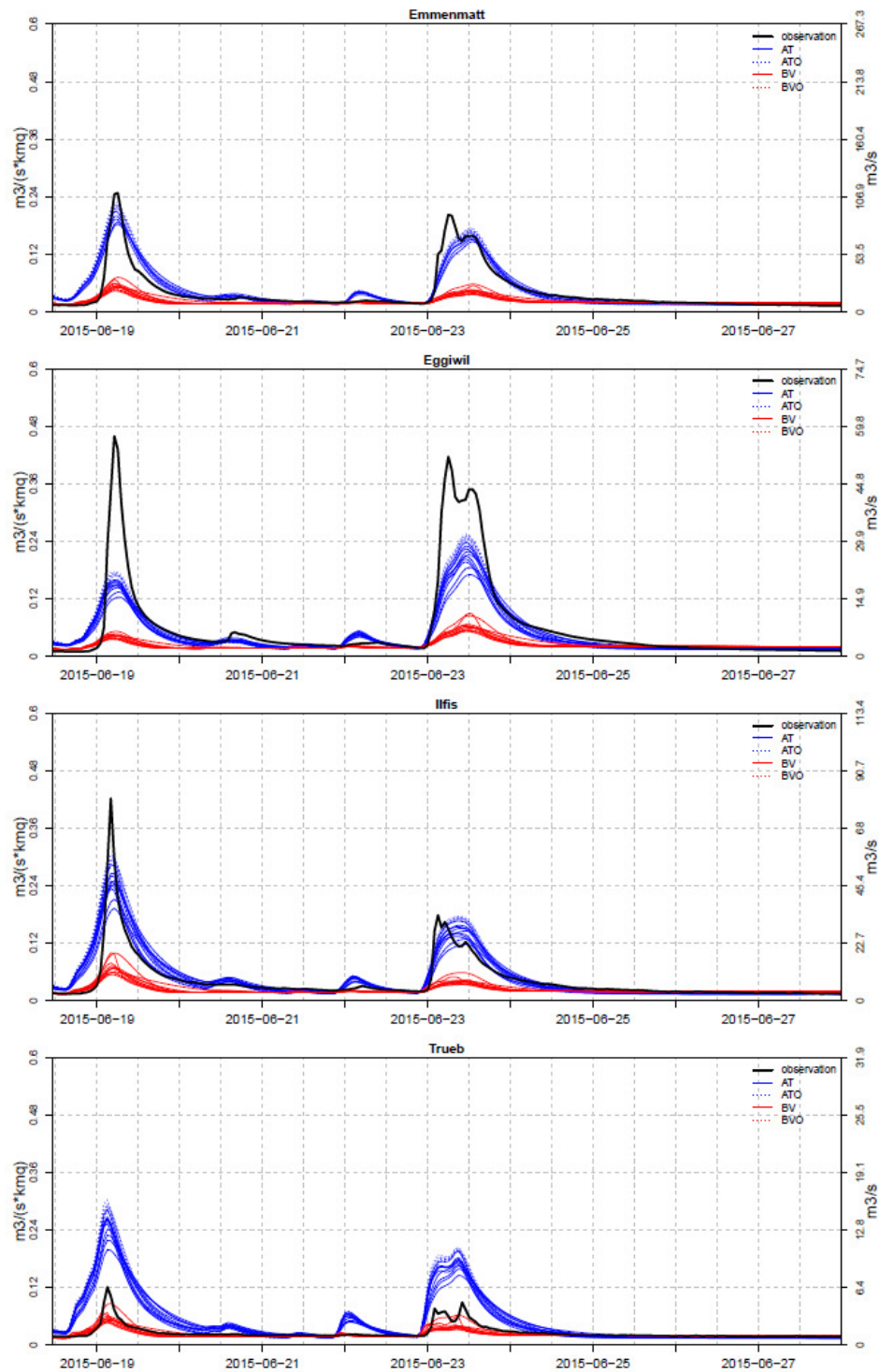


Abb. C8: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und mit den AT-basierten (blau) bzw. BV-basierten (rot) Parametrisierungen simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Gebiete. Kontinuierliche (strichlierte) Linien beziehen sich auf die Varianten ohne (mit) Optimierung.

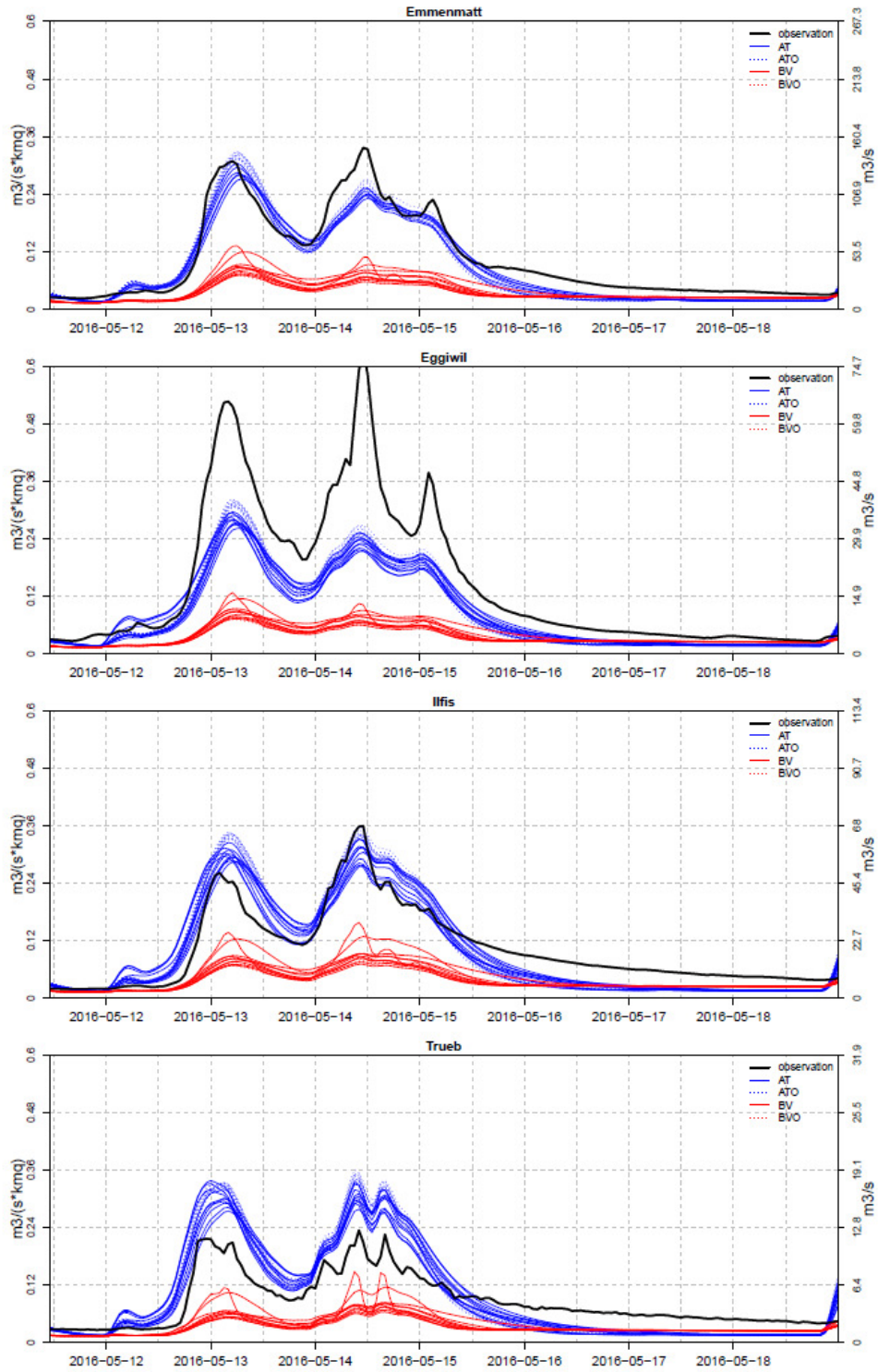


Abb. C9: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und mit den AT-basierten (blau) bzw. BV-basierten (rot) Parametrisierungen simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Gebiete. Kontinuierliche (strichlierte) Linien beziehen sich auf die Varianten ohne (mit) Optimierung.

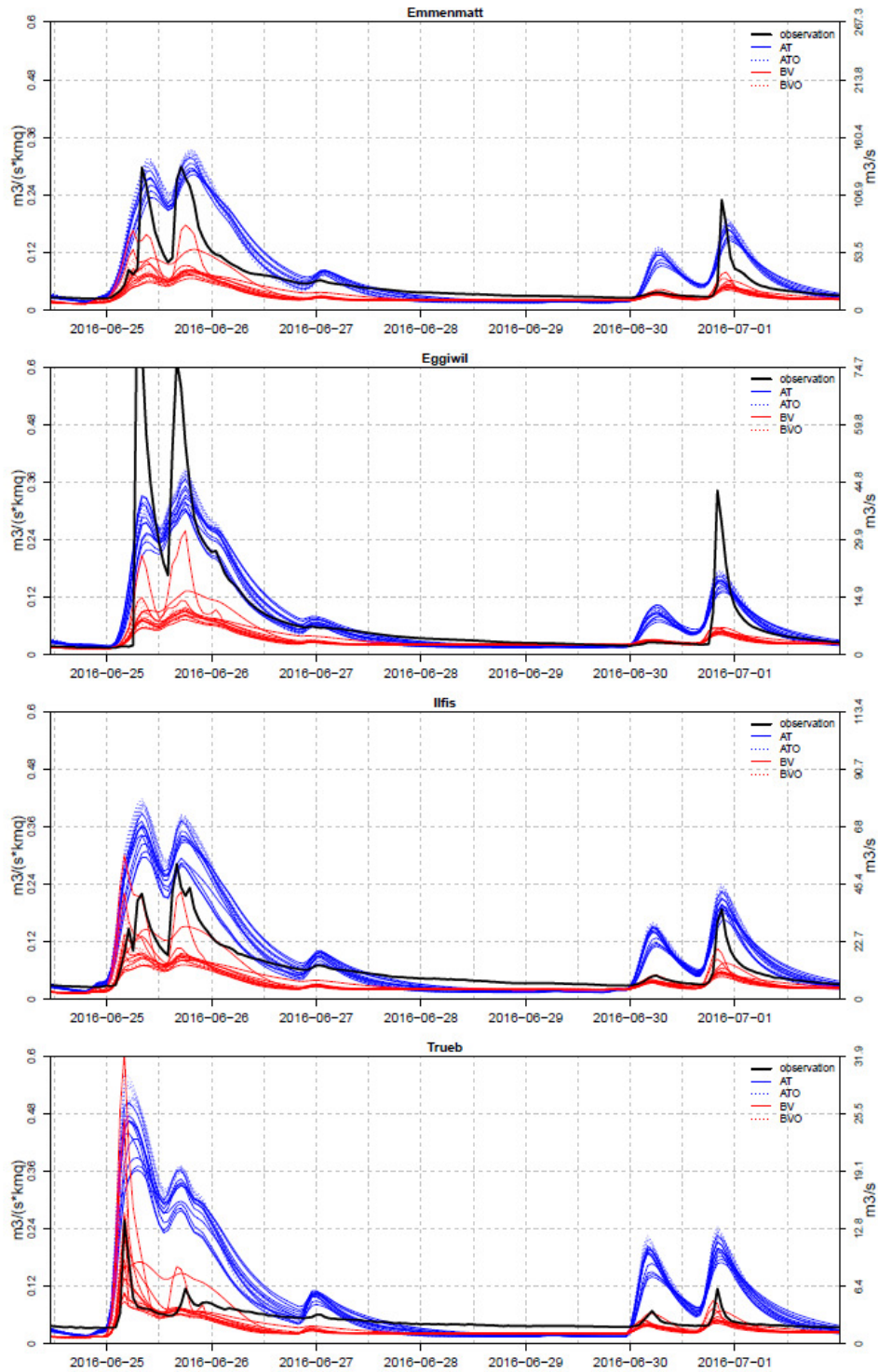


Abb. C10: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und mit den AT-basierten (blau) bzw. BV-basierten (rot) Parametrisierungen simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Gebiete. Kontinuierliche (strichlierte) Linien beziehen sich auf die Varianten ohne (mit) Optimierung.

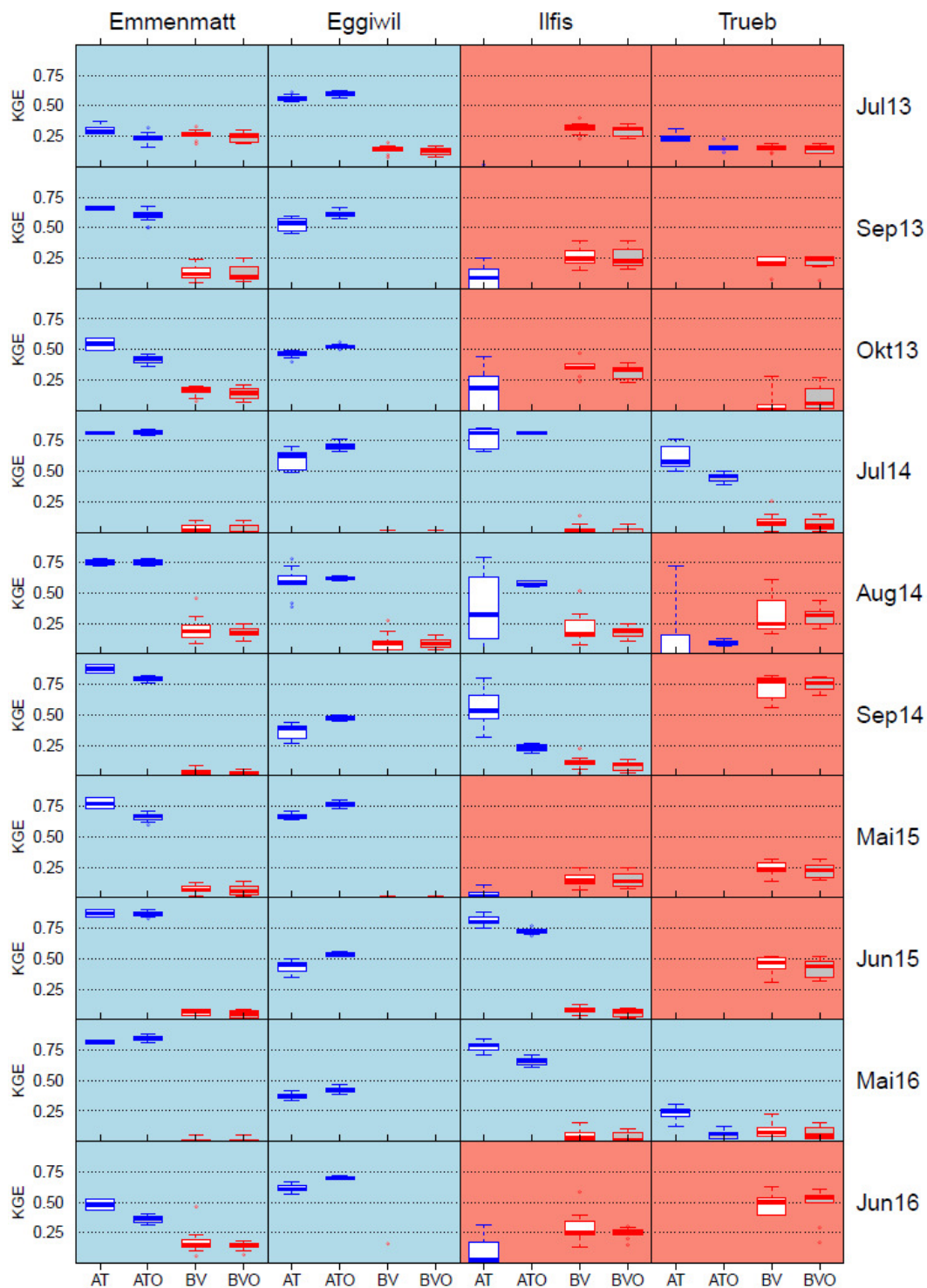


Abb. C11: Ergebnisse aus den Simulationen mit den verschiedenen Parametrisierungen für das prozessnahe Modell. Für jedes Ereignis (gleiche Reihe) und jedes EZG (gleiche Spalte) sind die KGE von zehn verschiedenen Simulationsläufen dargestellt. Blaue (rote) Boxplots beziehen sich auf die auf den Abflusstypen (Berechnungsversuchen) basierte Parametrisierungsstrategie mit bzw. ohne Optimierung der Bereiche. Die Farben im Hintergrund geben Auskunft, welche Parametrisierung zu den besten Ergebnissen führte.

Anhang D: Fallstudie 1 - Ergebnisse des Vergleichs zwischen dem prozessnahen Abfluss-bildungsmodul und dem traditionellen PREVAH

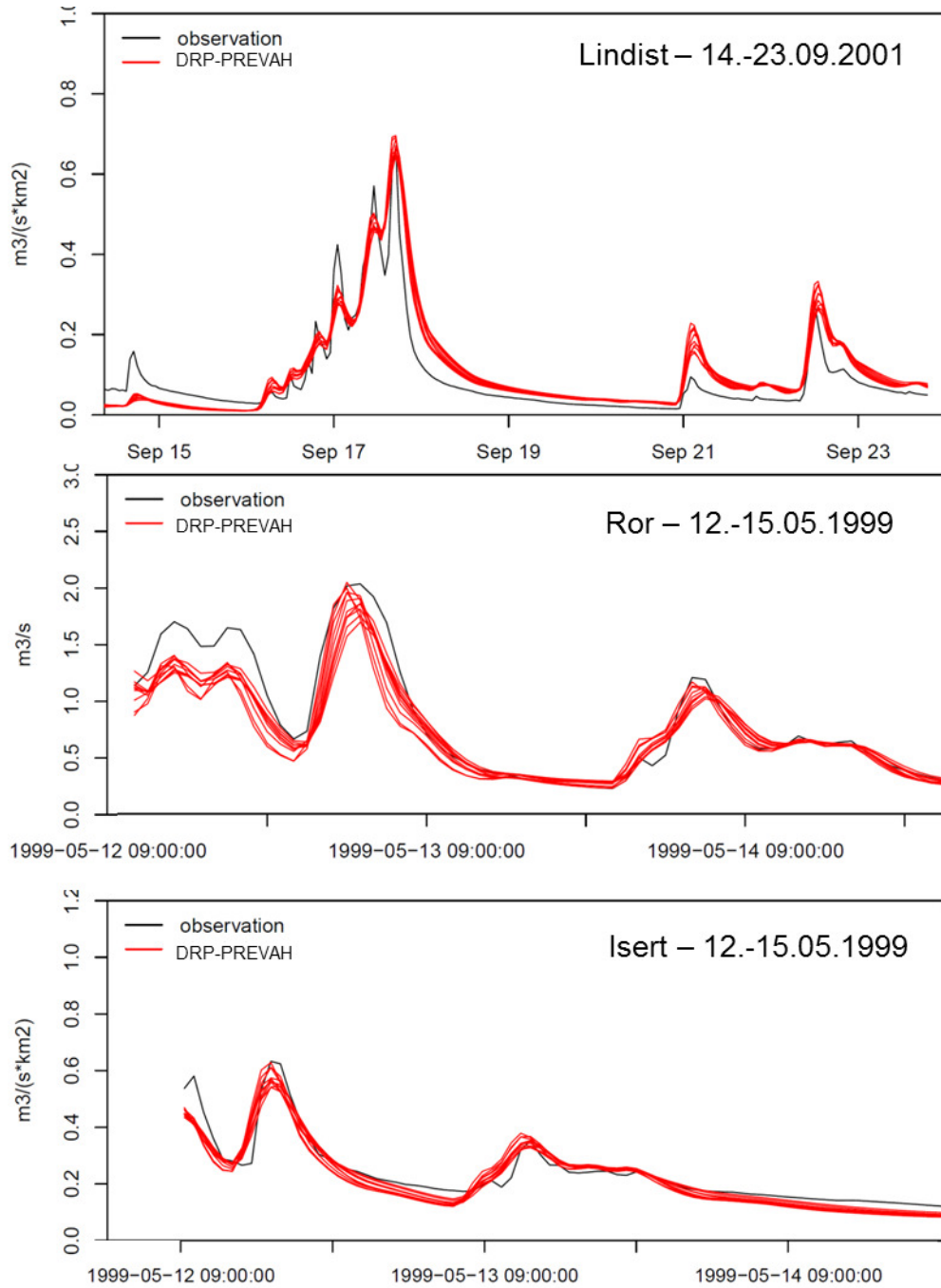


Abb. D1: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und simulierten (rot) Ganglinien für verschiedene EZG der Fallstudie 1.

70



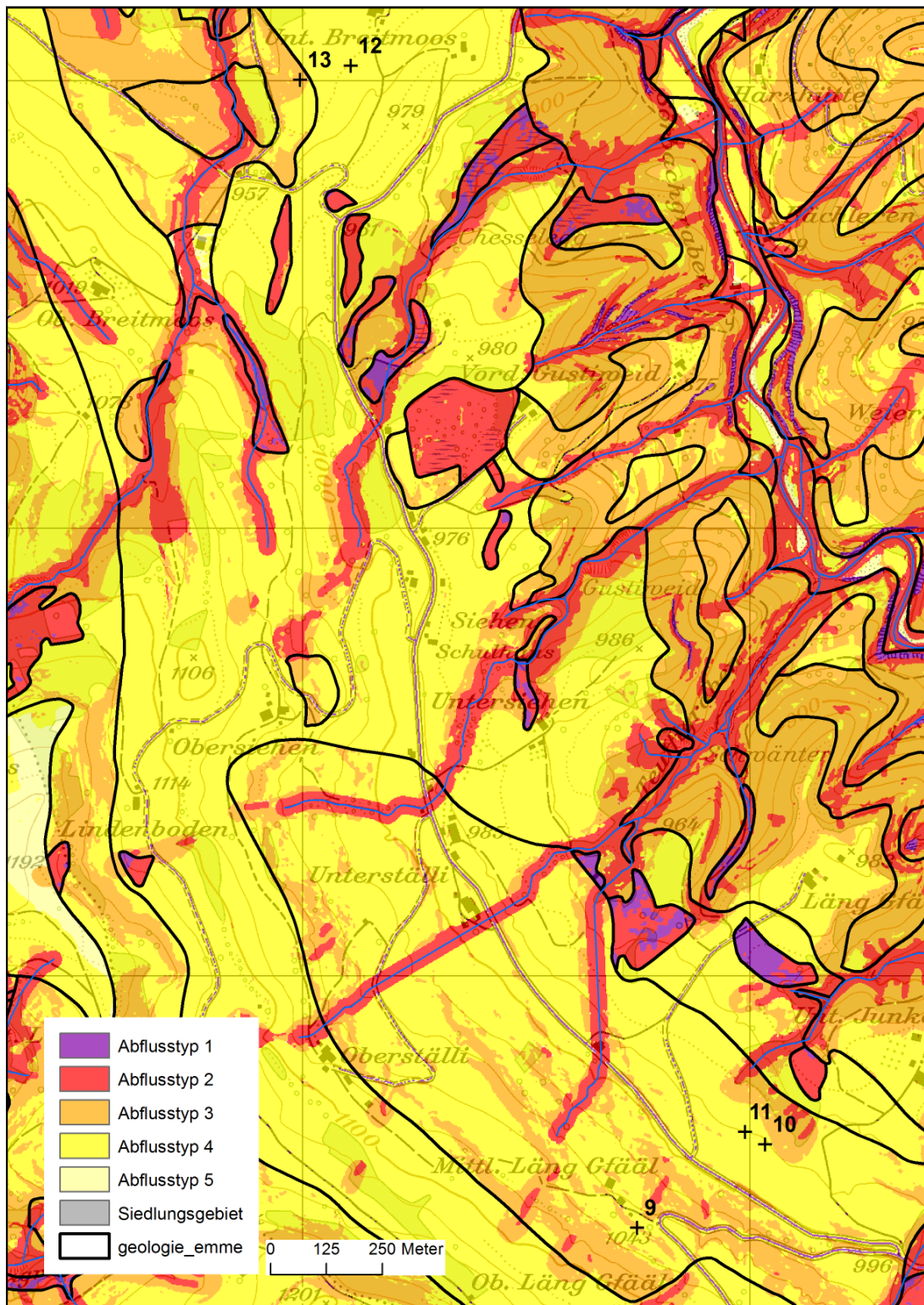


Abb. E2: Standorte 10 bis 13 der Feldüberprüfung der Abflusstypenkarte..

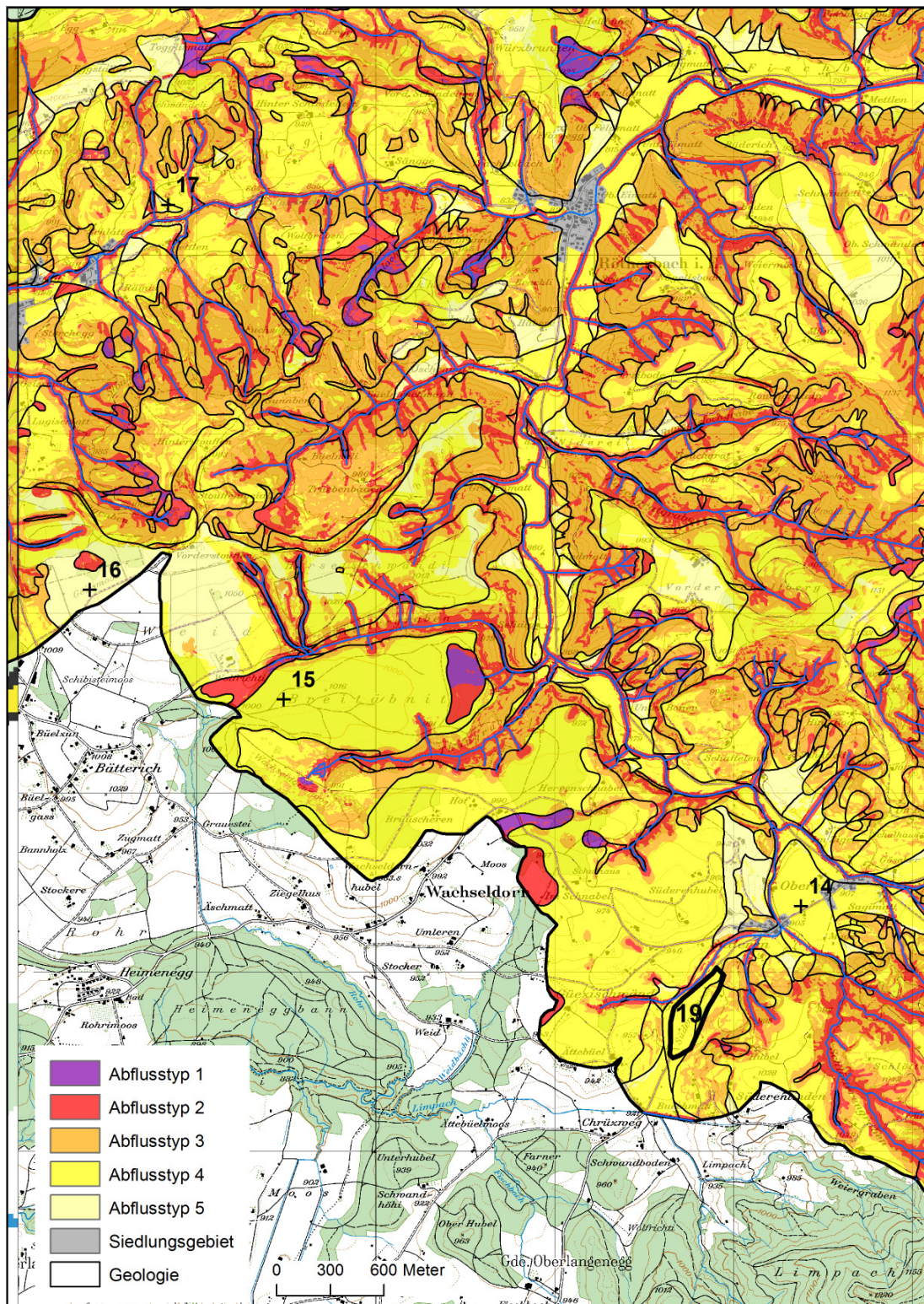


Abb. E3: Standorte 14, 15, 16, 17, 19 der Feldüberprüfung der Abflusstypenkarte..

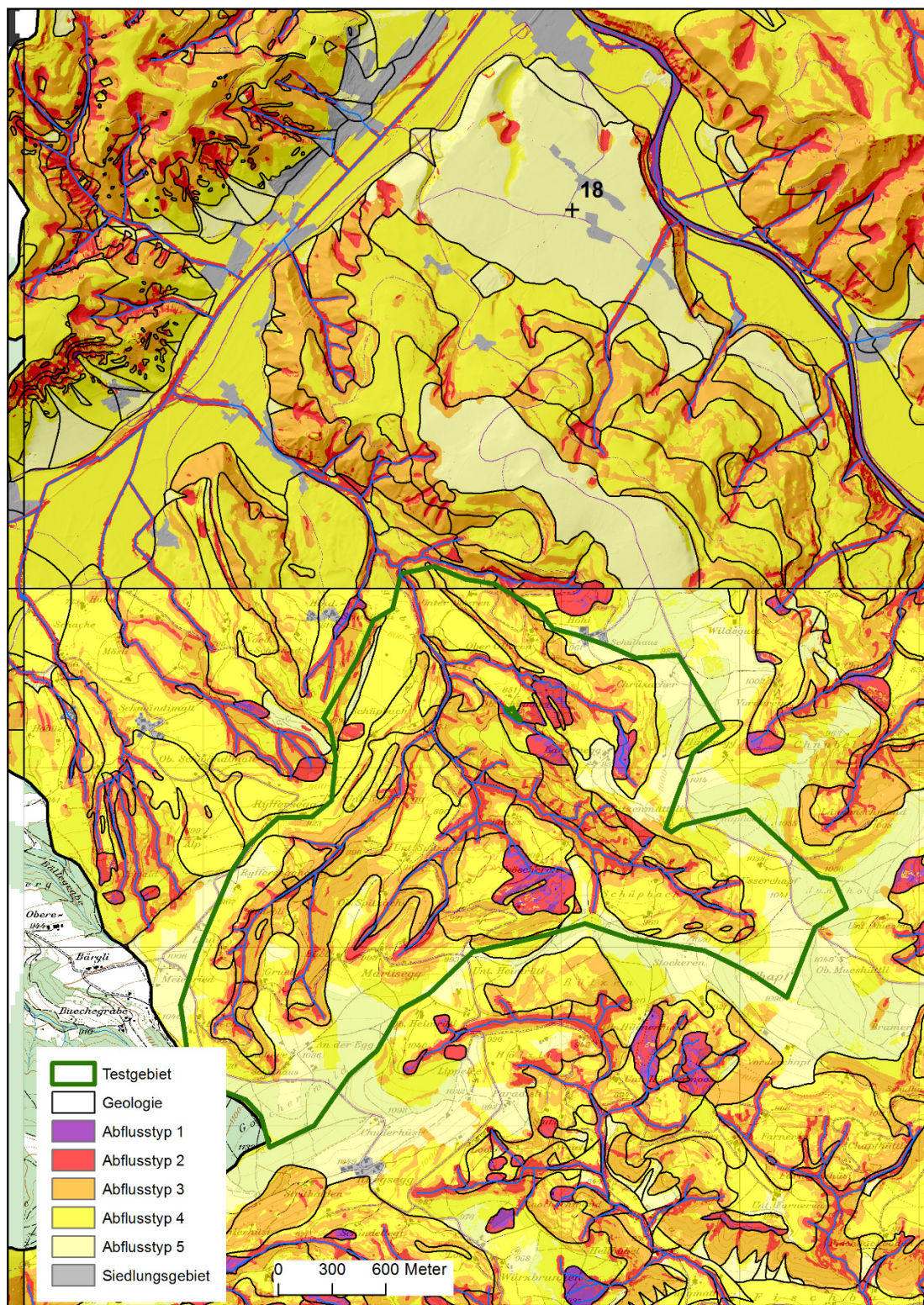


Abb. E4: Standort 18 der Feldüberprüfung der Abflusstypenkarte. Grün eingrahmt ist das Testgebiet.

Anhang G: Parameterwerte nach Viroli et al. (2009b) für jedes EZG

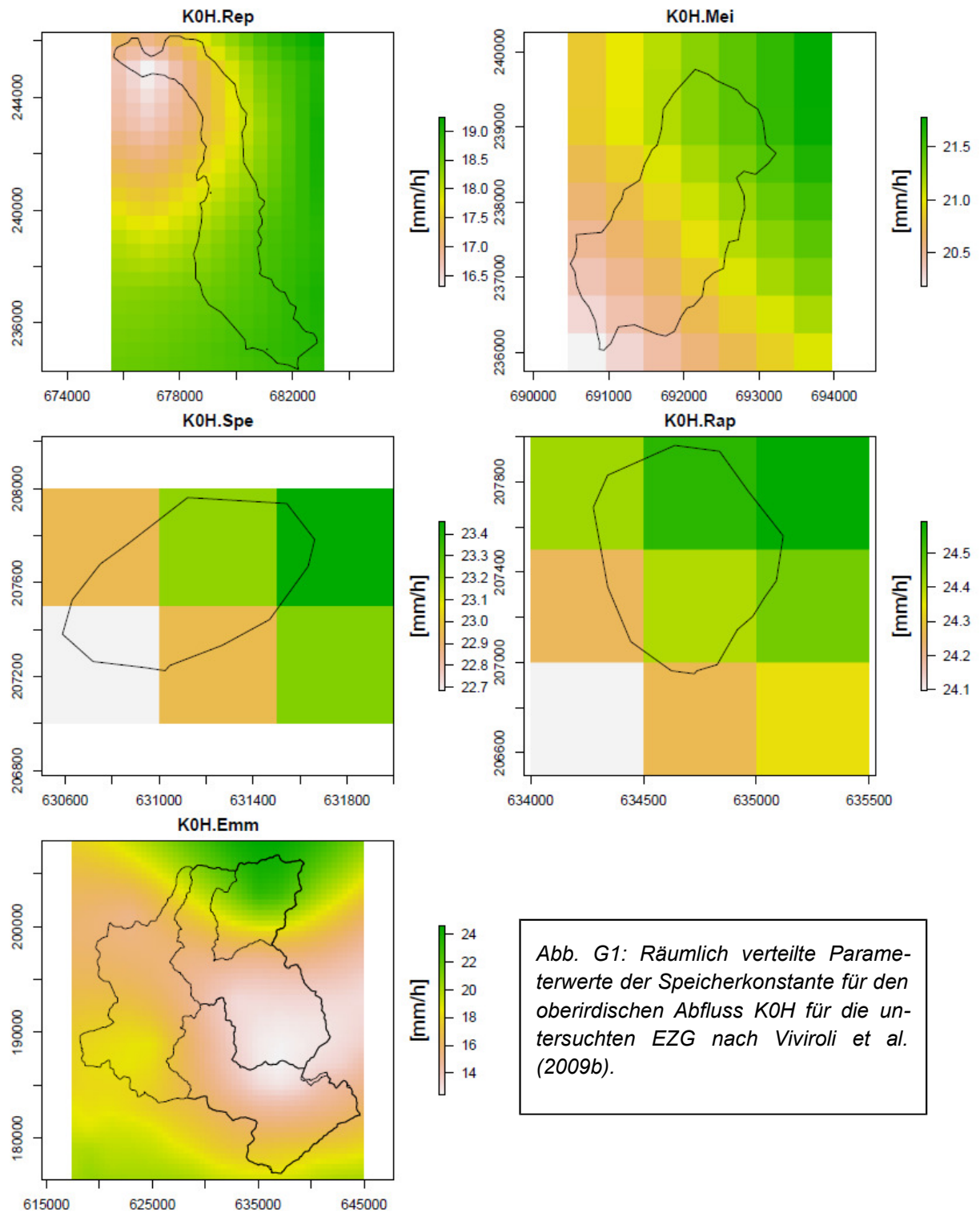


Abb. G1: Räumlich verteilte Parameterwerte der Speicherkonstante für den oberirdischen Abfluss K_{0H} für die untersuchten EZG nach Viroli et al. (2009b).

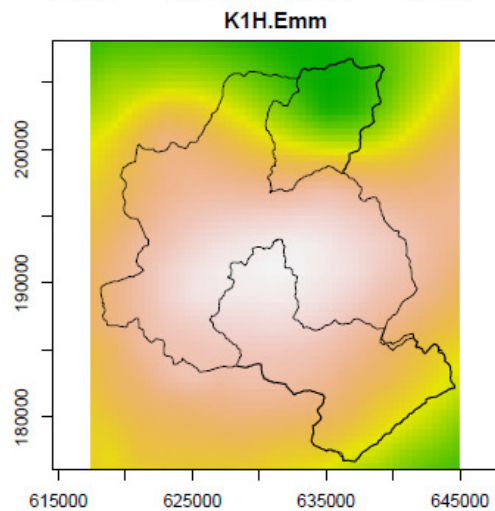
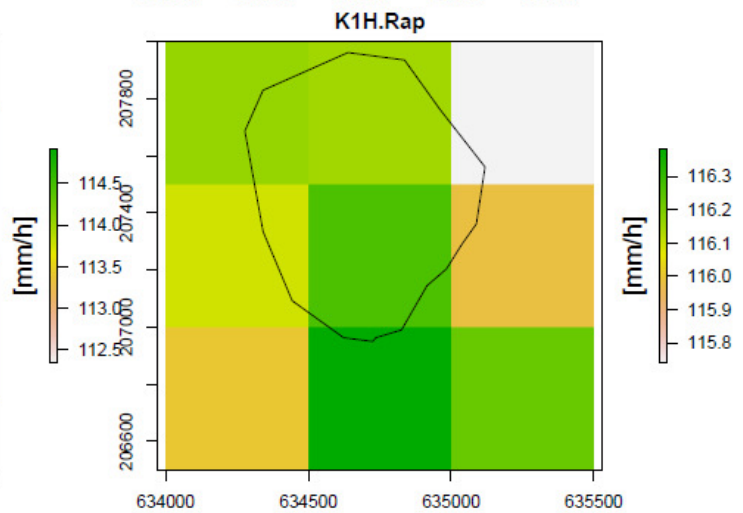
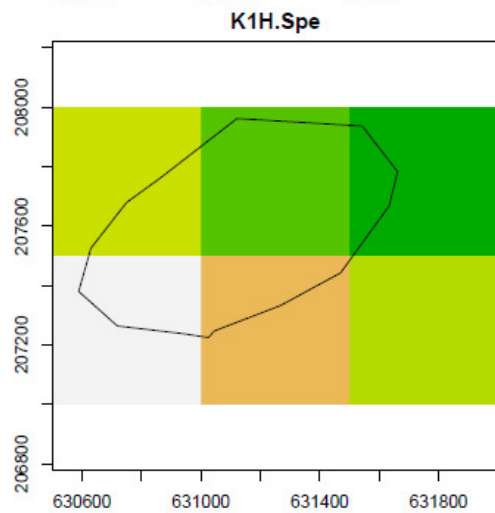
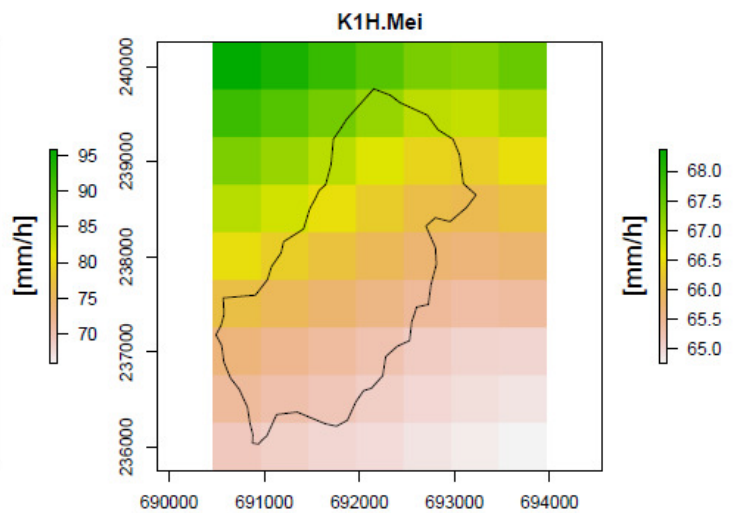
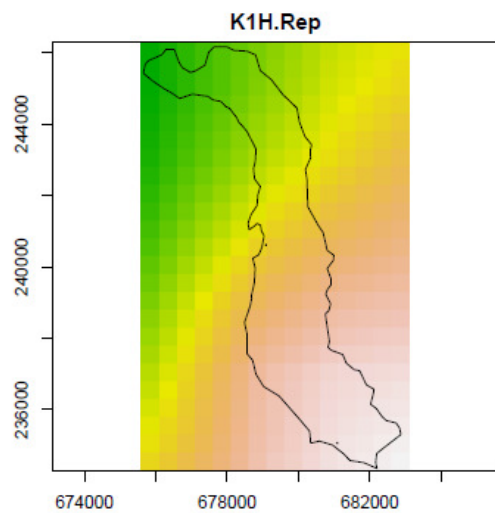


Abb. G2: Räumlich verteilte Parameterwerte der Speicherkonstante für den unterirdischen Abfluss K1H für die untersuchten EZG nach Vivioli et al. (2009b).

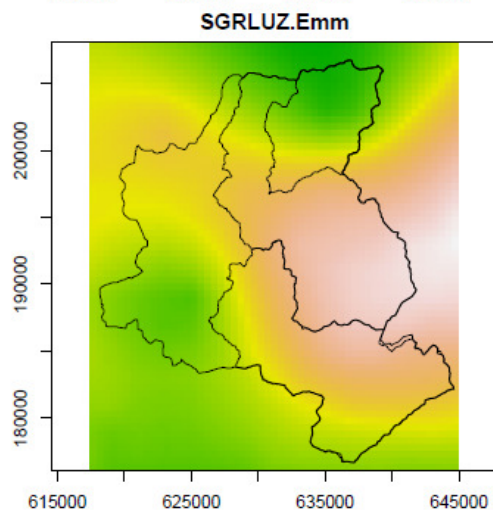
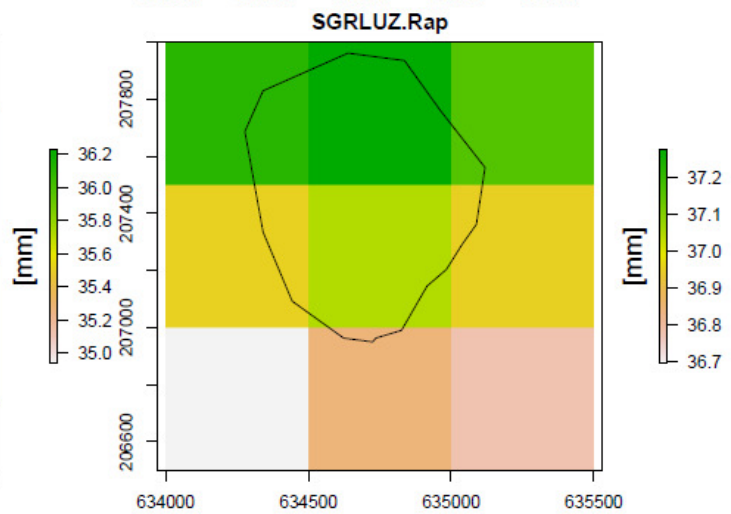
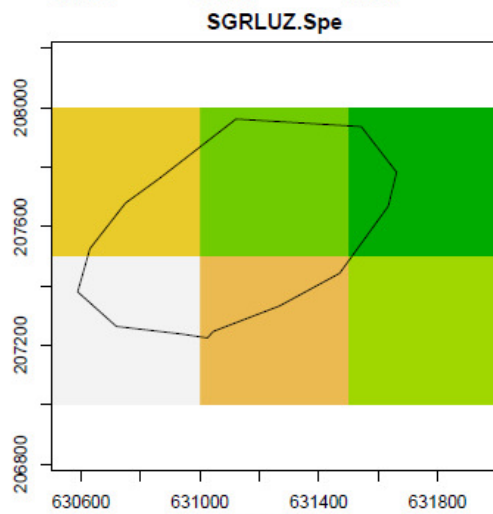
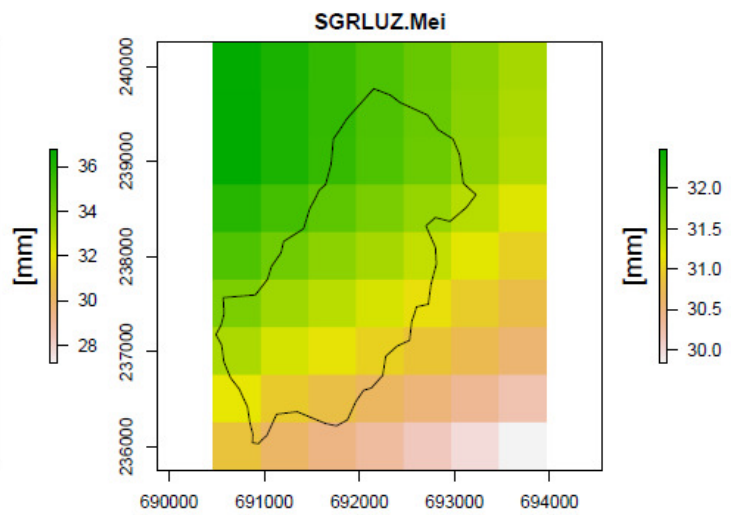
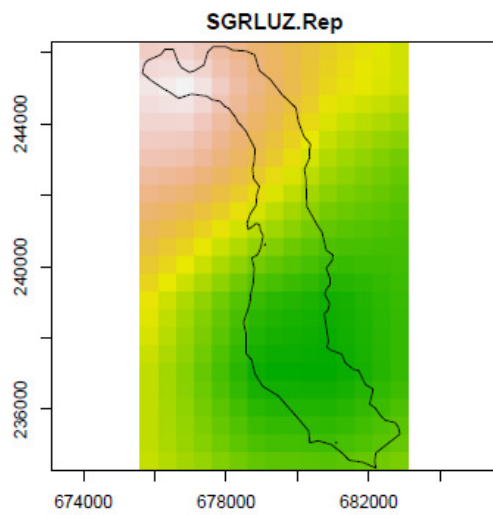


Abb. G3: Räumlich verteilte Parameterwerte des Grenzwertes zur Aktivierung des oberirdischen Abflusses SGRLUZ für die untersuchten EZG nach Vivioli et al. (2009b).

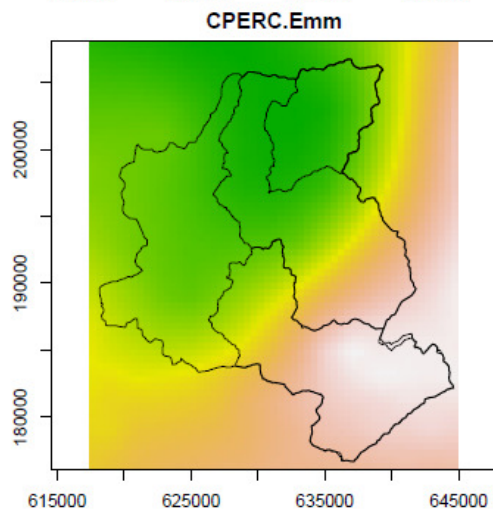
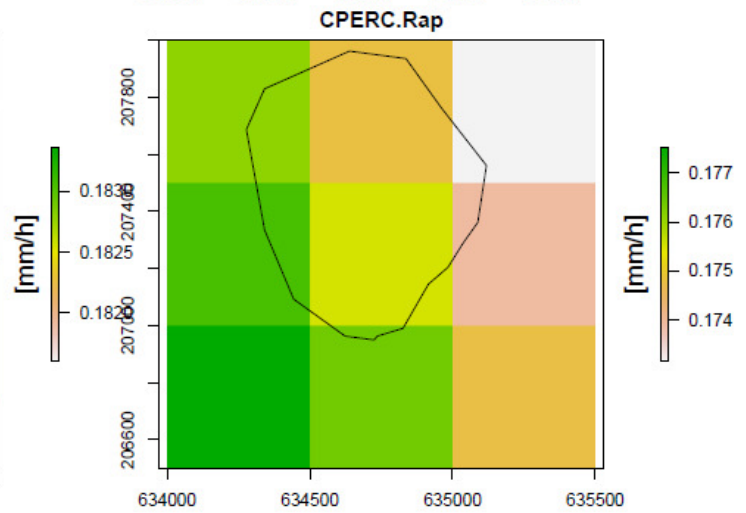
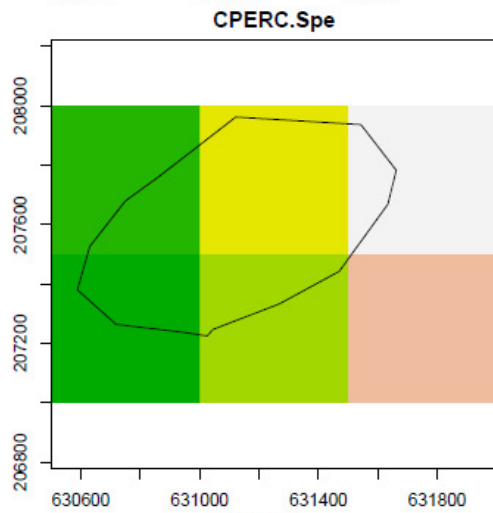
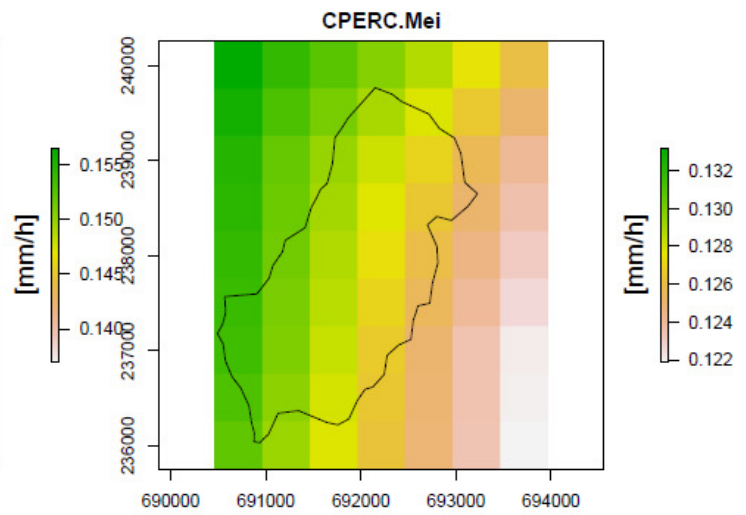
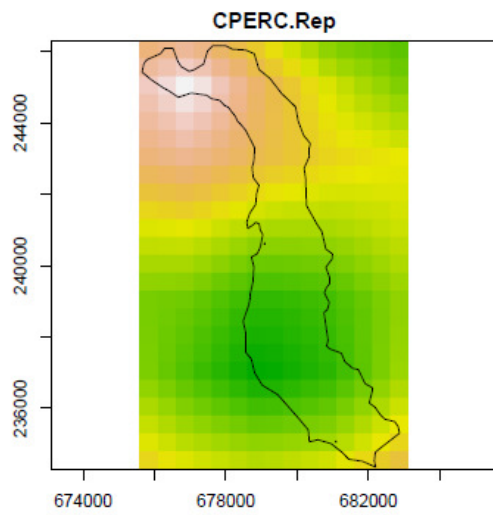


Abb. G4: Räumlich verteilte Parameterwerte der maximalen Perkulationsintensität CPERC für die untersuchten EZG nach Viviroli et al. (2009b).

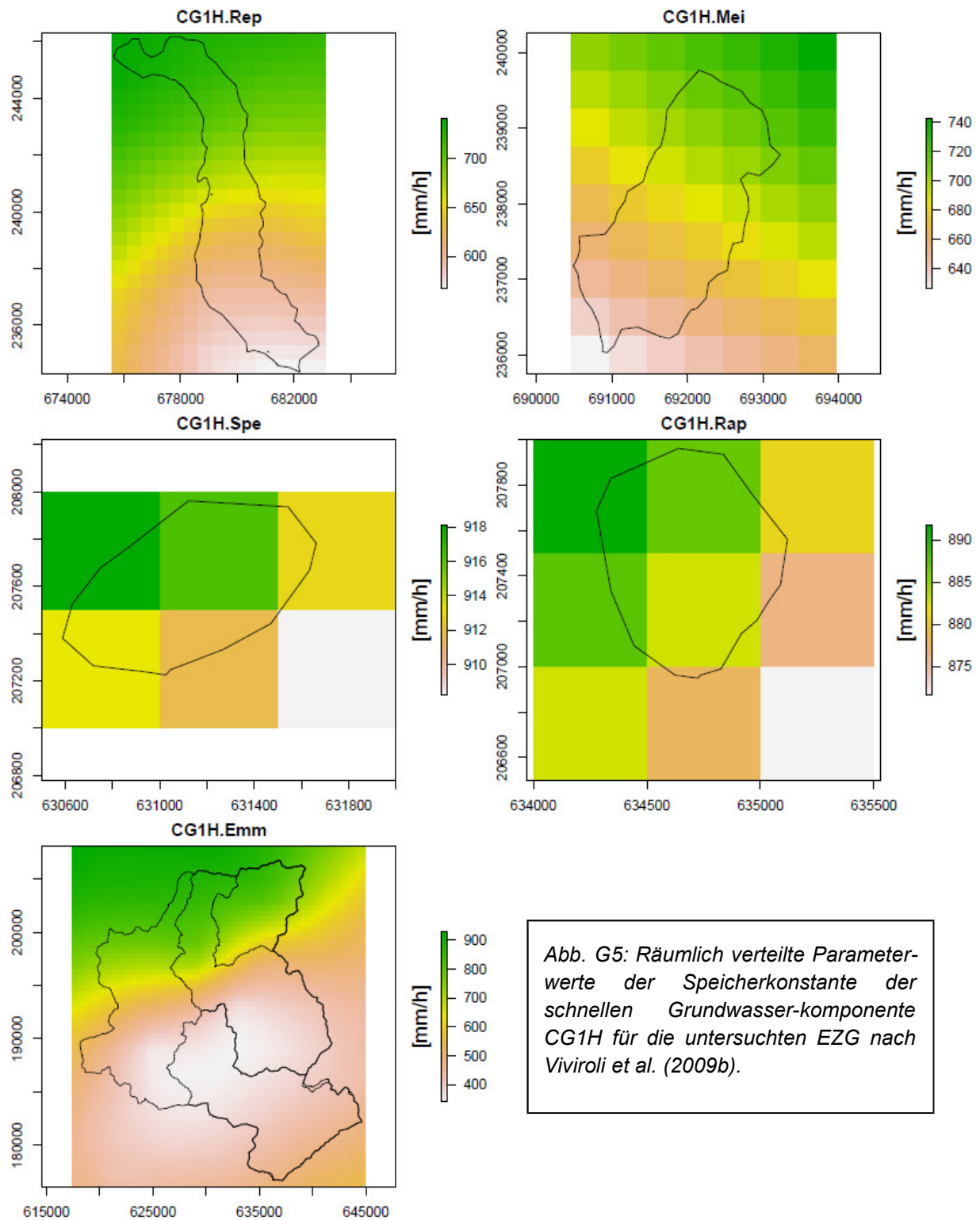


Abb. G5: Räumlich verteilte Parameterwerte der Speicherkonstante der schnellen Grundwasser-komponente CG1H für die untersuchten EZG nach Vivioli et al. (2009b).

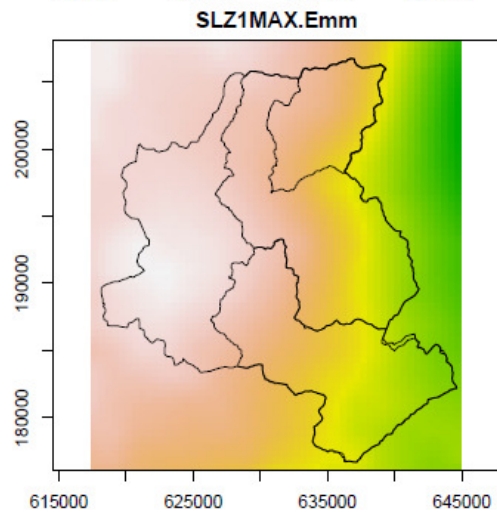
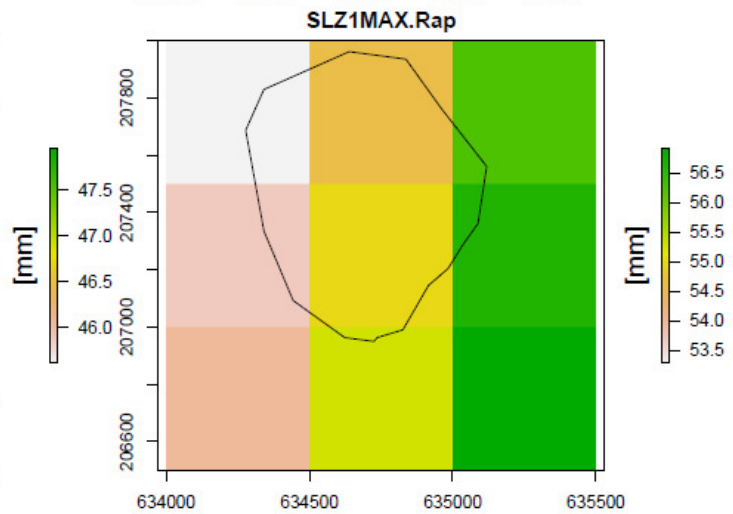
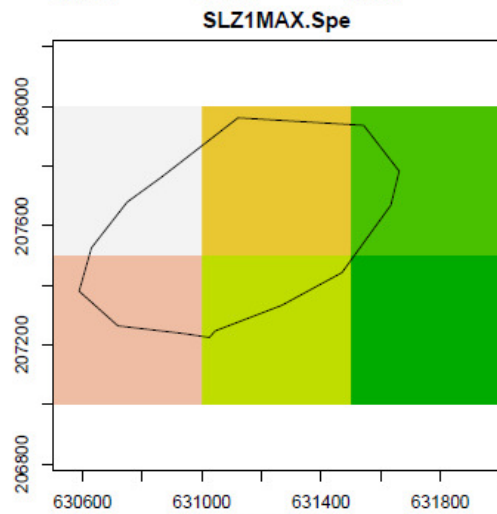
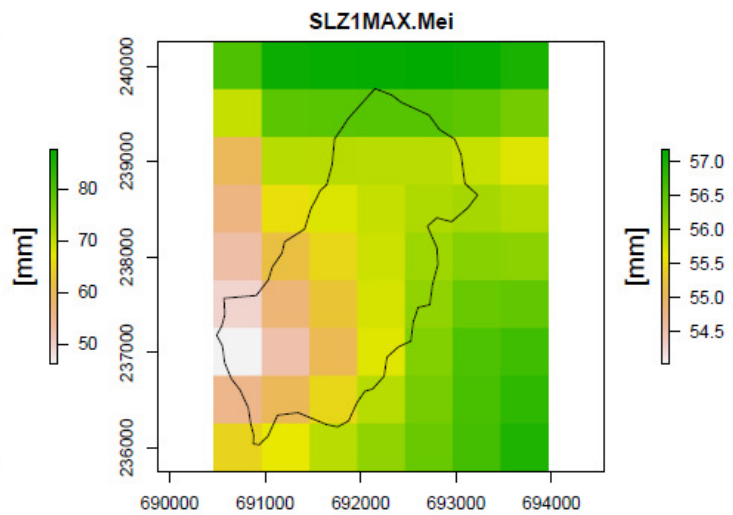
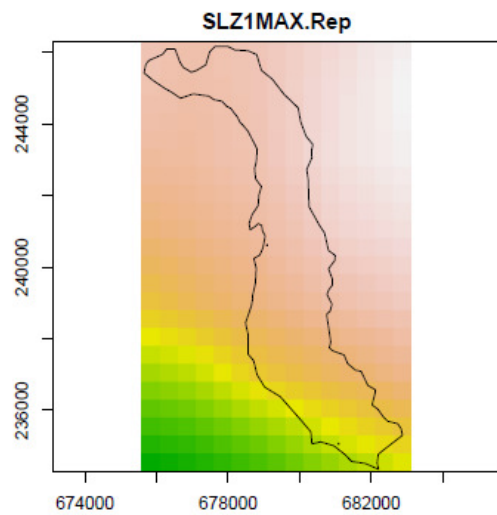


Abb. G6: Räumlich verteilte Parameterwerte der maximalen Kapazität des Grundwasserspeichers für den schnellen Grundwasserabfluss SLZ1MAX für die untersuchten EZG nach Vivioli et al. (2009b).

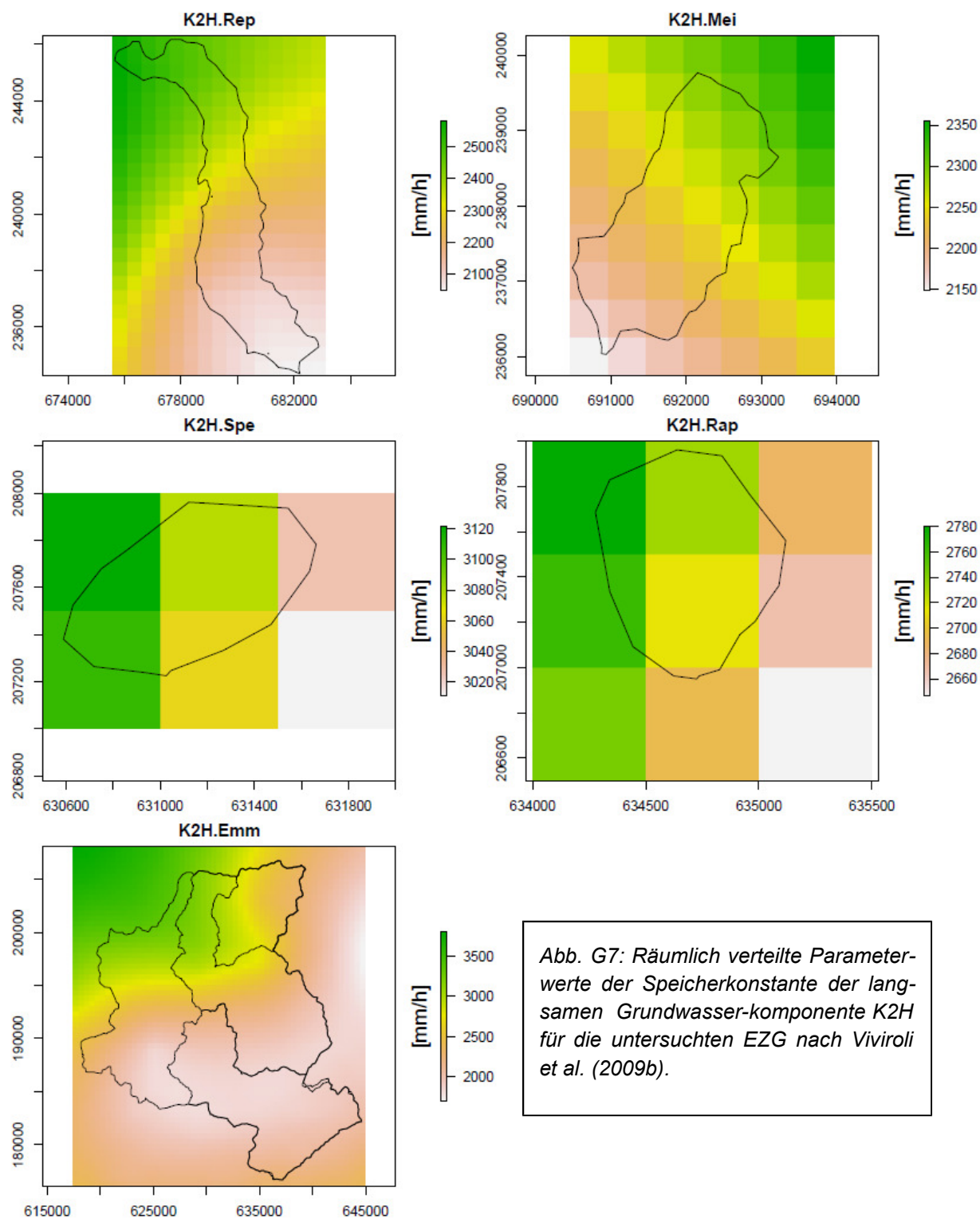


Abb. G7: Räumlich verteilte Parameterwerte der Speicherkonstante der langsamen Grundwasser-komponente $K2H$ für die untersuchten EZG nach Viroli et al. (2009b).

Anhang H: Fallstudie 2 - Ergebnisse des Vergleichs zwischen dem prozessnahen Abfluss-bildungsmodul und dem traditionellen PREVAH

Abbildung H0 zeigt, dass das prozessnahe Modell durchschnittlich bessere Ergebnisse auf die Gebiete der Reppisch, des Dorbachs Meilen und der Emme liefern konnte (mit der Ausnahme vom Teil-EZG der Trueb, wo die Abflüsse leicht überschätzt wurden). In den kleinen EZG von Sperbelgraben und Rappengraben liefert allerdings das traditionelle PREVAH durchschnittlich bessere Resultate. Die Überschätzung der Abflussspitzen in diesen zwei EZG durch das prozessnahe Modell ist auf falsche Anfangsbedingungen rückführbar, da die Feldkapazität aus der Bodeneignungskarte dort stark unterschätzt wird (nicht gezeigt).

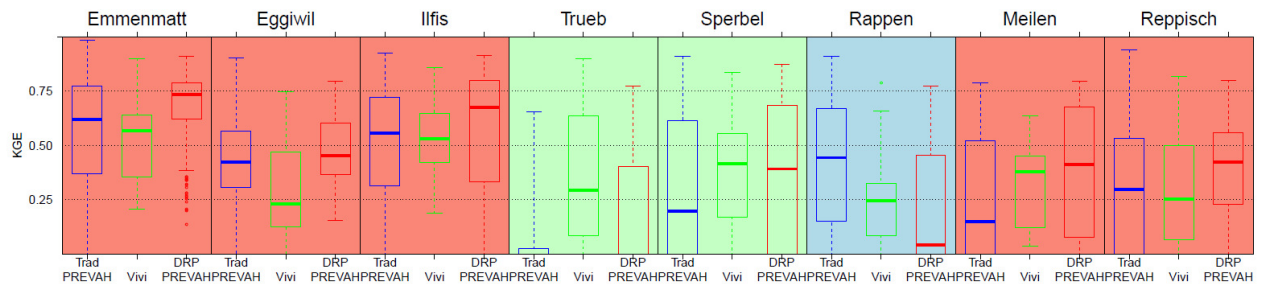


Abb. H0: Ergebnisse der Simulationen in den in Kapitel 5.1 und 5.2 beschriebenen EZG. Die Ergebnisse aus allen einzelnen Ereignissen sind in Anhang H aufgeführt. Blaue Boxplots beziehen sich auf das traditionelle PREVAH kalibriert auf den Sperbelgraben während des Ereignisses im Juli 2014. Grüne Boxplots beziehen sich auf das Regionalisierungsverfahren nach Viviroli et al. (2009b), während die roten Boxplots dem prozessbasierten Modell entsprechen. Die Farben im Hintergrund geben Auskunft, welche Modellkonfiguration zu den besten Ergebnissen führte.

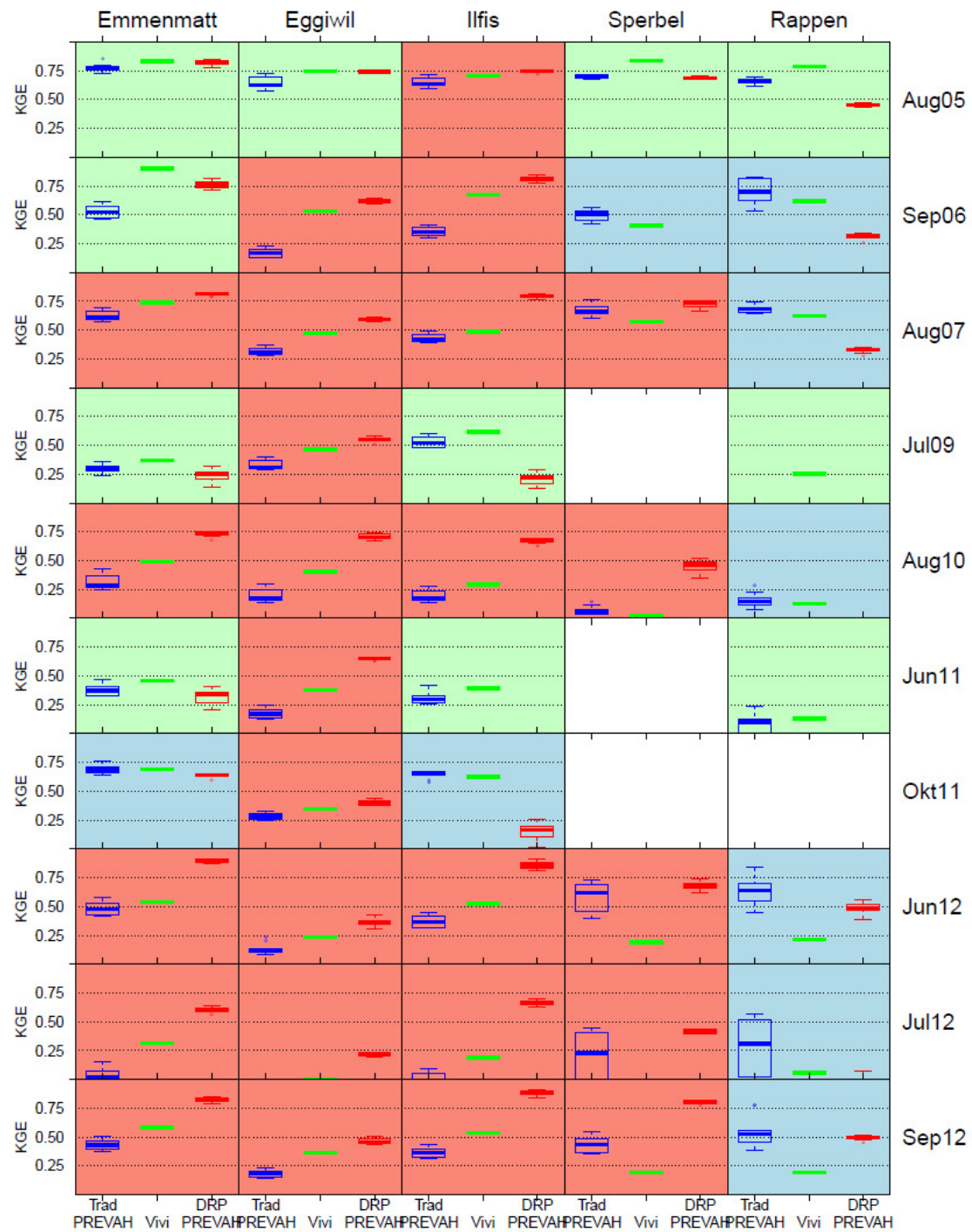


Abb. H1: Ergebnisse der Simulationen im EZG der Emme und deren Teil-EZG und im Sperbelgraben und Rappengraben. Blaue Boxplots beziehen sich auf das traditionelle PREVAH kalibriert im Sperbelgraben während des Ereignisses im Juli 2014. Grüne Boxplots beziehen sich auf das Regionalisierungsverfahren nach Viviroli et al. (2009b), während die roten Boxplots dem prozessbasierten Modell entsprechen. Die Farben im Hintergrund geben Auskunft, welche Modellkonfiguration zu den besten Ergebnissen führte.

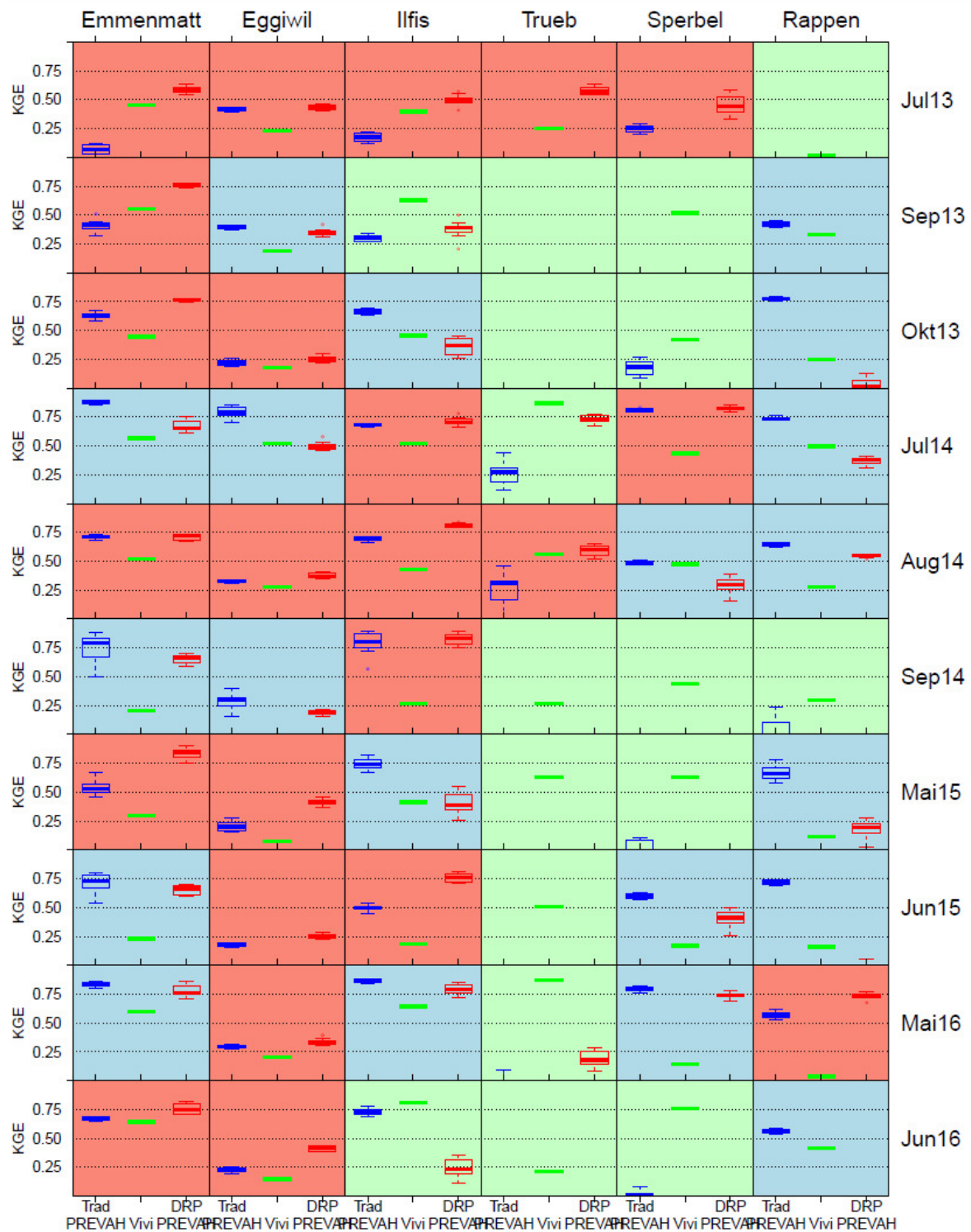


Abb. H2: Ergebnisse der Simulationen im EZG der Emme und deren Teil-EZG im Sperbelgraben und Rappengraben. Blaue Boxplots beziehen sich auf das traditionelle PREVAH kalibriert im Sperbelgraben während des Ereignisses im Juli 2014. Grüne Boxplots beziehen sich auf das Regionalisierungsverfahren nach Vivioli et al. (2009b), während die roten Boxplots dem prozessbasierten Modell entsprechen. Die Farben im Hintergrund geben Auskunft, welche Modellkonfiguration zu den besten Ergebnissen führte.

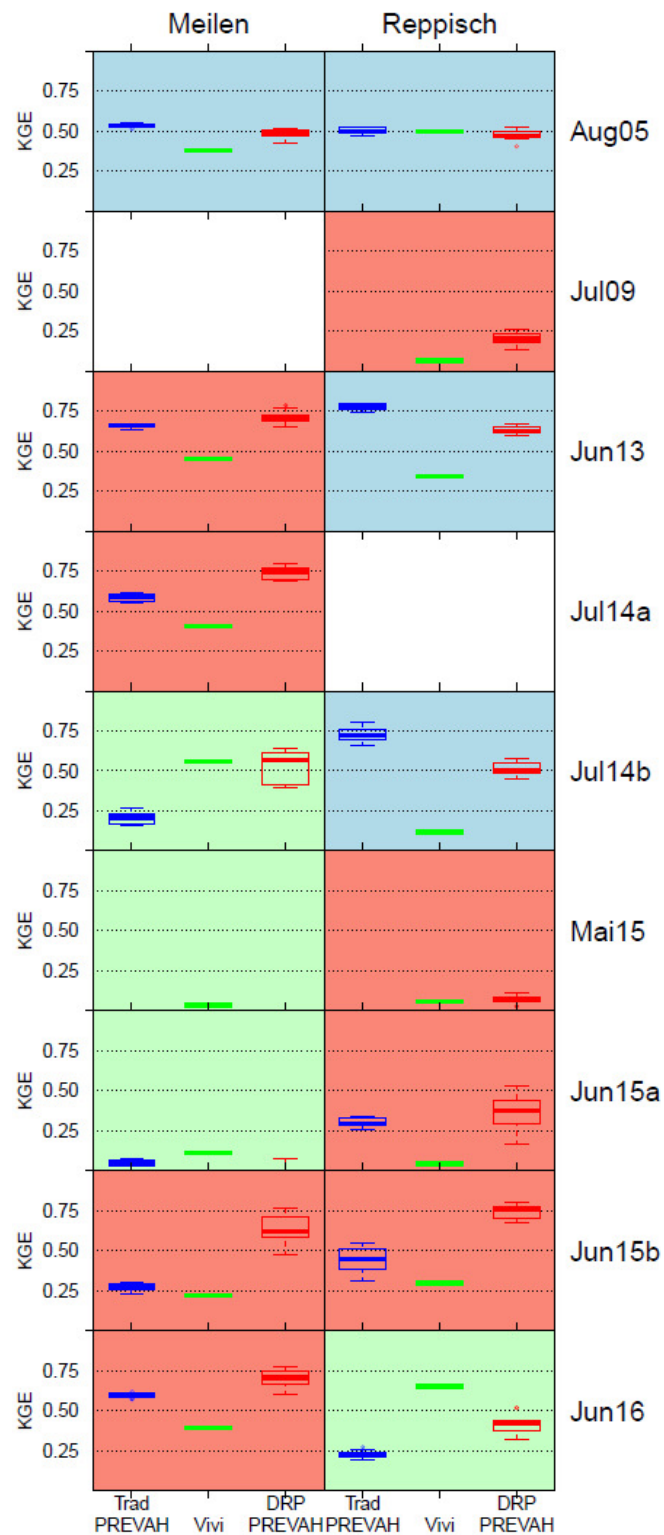


Abb. H3: Ergebnisse der Simulationen in den EZG der Reppisch und des Dorfbachs Meilen. Blaue Boxplots beziehen sich auf das traditionelle PREVAH kalibriert im Sperbelgraben während des Ereignisses im Juli 2014. Grüne Boxplots beziehen sich auf das Regionalisierungsverfahren nach Viviroli et al. (2009b), während die roten Boxplots dem prozessbasierten Modell entsprechen. Die Farben im Hintergrund geben Auskunft, welche Modellkonfiguration zu den besten Ergebnissen führte.

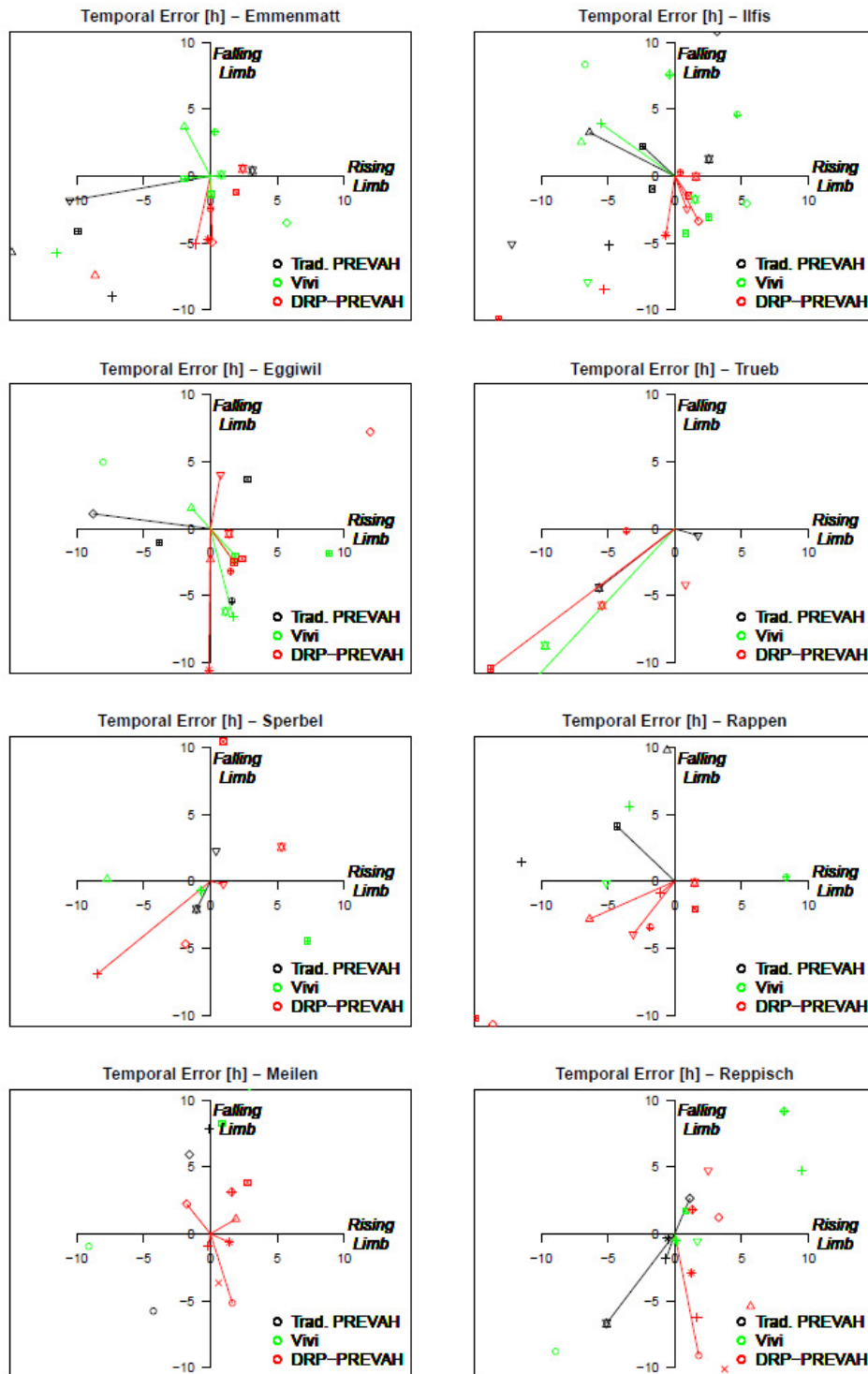


Abb. H4: Zeitliche Abweichung des steigenden bzw. abfallenden Teils der simulierten Ganglinien für die verschiedenen EZG. Jeder Punkt entspricht einem Ereignis, das entweder mit dem traditionellen Modell (schwarz), mit dem Regionalisierungsverfahren nach Viroli et al. (2009; grün) oder mit dem prozessnahen Modell (rot) berechnet wurde. Eine Linie zeigt, für jedes Ereignis, welche Methode zum besten Simulationsergebnis führt.

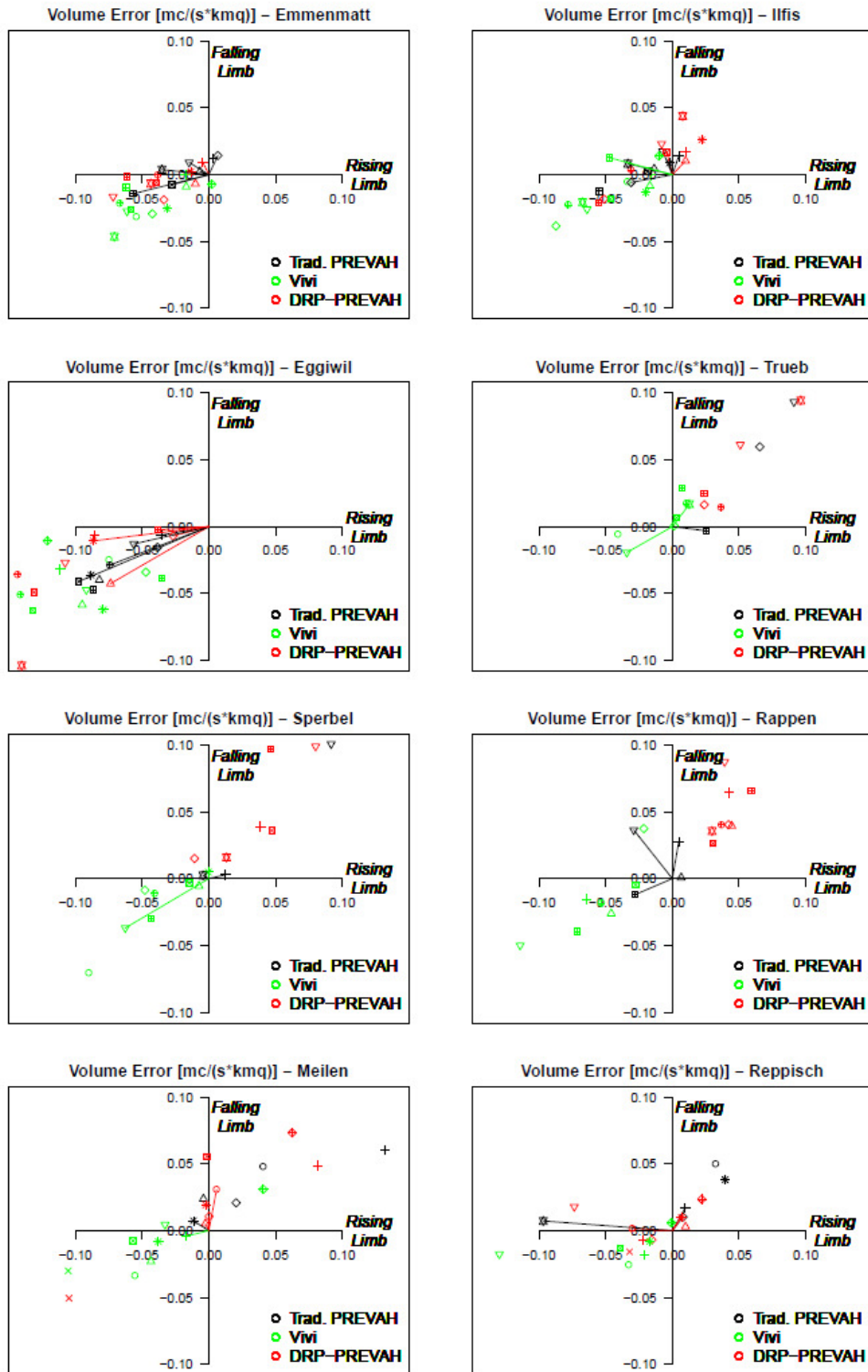


Abb. H5: Volumetrische Abweichung des steigenden bzw. abfallenden Teils der simulierten Ganglinien für die verschiedenen EZG. Jeder Punkt entspricht einem Ereignis, das entweder mit dem traditionellen Modell (schwarz), mit dem Regionalisierungsverfahren nach Viroli et al. (2009; grün) oder mit dem prozessnahen Modell (rot) berechnet wurde. Eine Linie zeigt, für jedes Ereignis, welche Methode zum besten Simulationsergebnis führt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Simulationen mit den verschiedenen Regionalisierungsansätze (vgl. Kapitel 5.1.2) dargestellt. Nur ein Teil der in Tab. 6 aufgelisteten Ereignisse wird allerdings gezeigt, nämlich alle Ereignisse ab 2013 auf das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen Teil-EZG. Für die restliche Ereignisse wird auf Anhang F verwiesen.

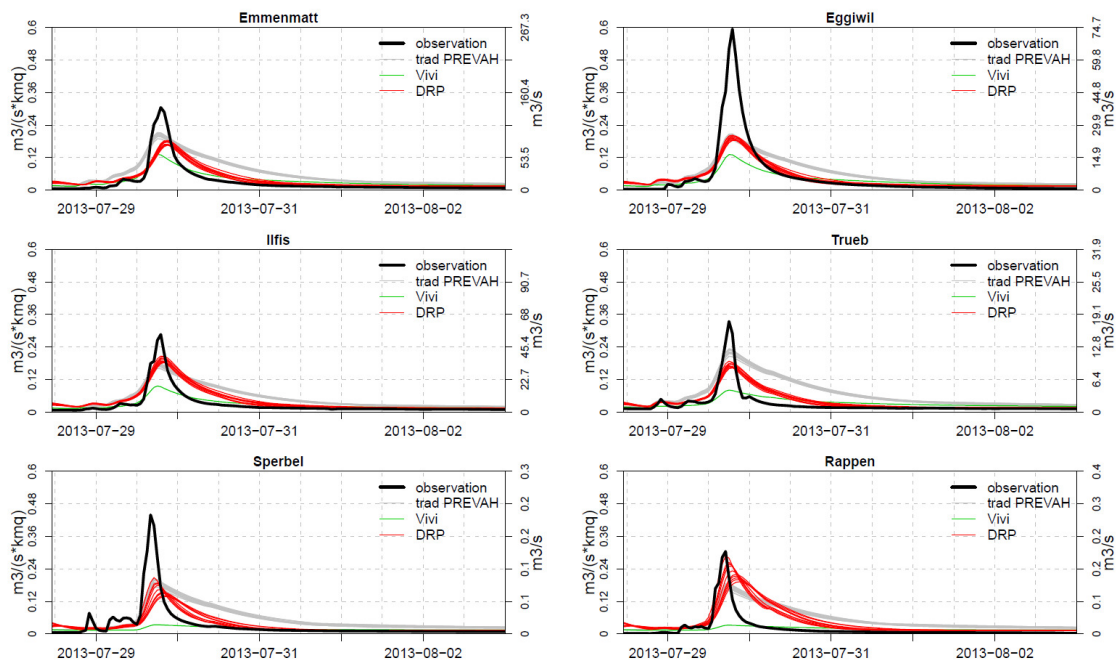


Abb. H6: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Teil-EZG. Die grauen Ganglinien wurden mit dem traditionellen PREVAH, die grünen Ganglinien mit dem Regionalisierungsverfahren nach Vivioli et al. (2009b) und die roten Ganglinien mit dem prozessbasierten Modell simuliert.

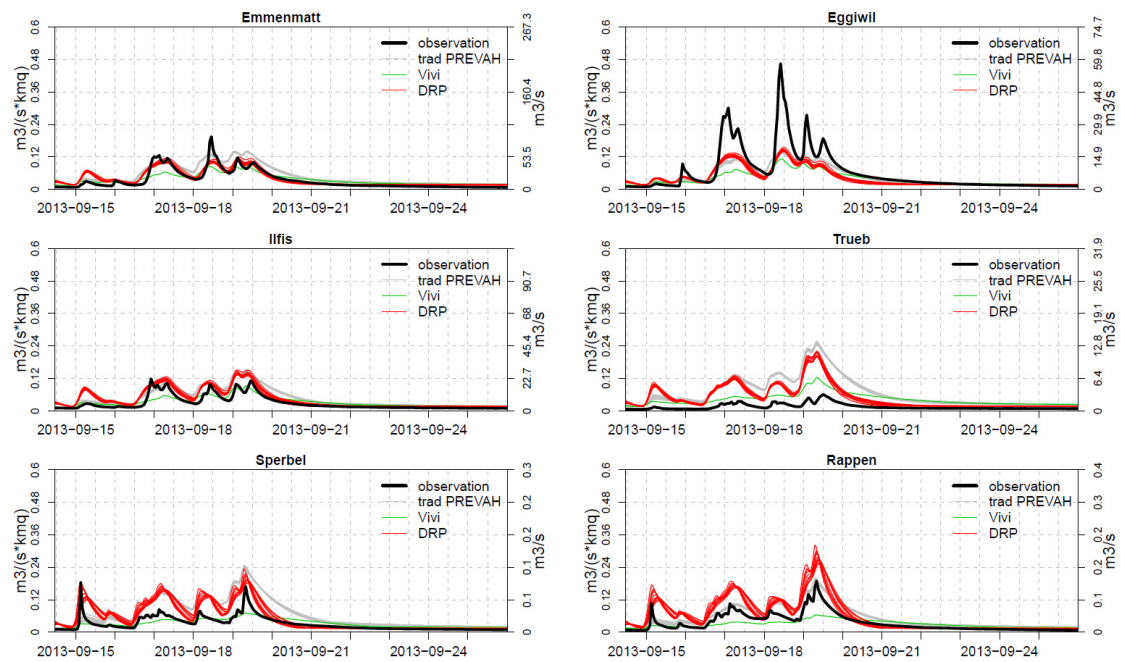


Abb. H7: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Teil-EZG. Die grauen Ganglinien wurden mit dem traditionellen PREVAH, die grünen Ganglinien mit dem Regionalisierungsverfahren nach Viroli et al. (2009b) und die roten Ganglinien mit dem prozessbasierten Modell simuliert.

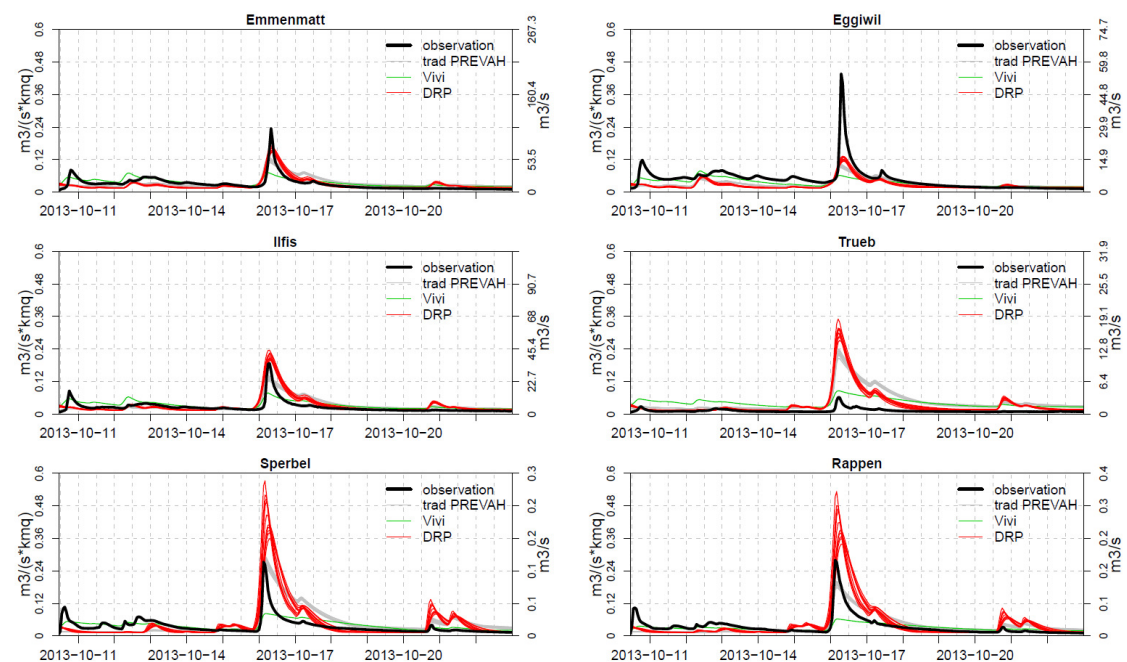


Abb. H8: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Teil-EZG. Die grauen Ganglinien wurden mit dem traditionellen PREVAH, die grünen Ganglinien mit dem Regionalisierungsverfahren nach Viroli et al. (2009b) und die roten Ganglinien mit dem prozessbasierten Modell simuliert.

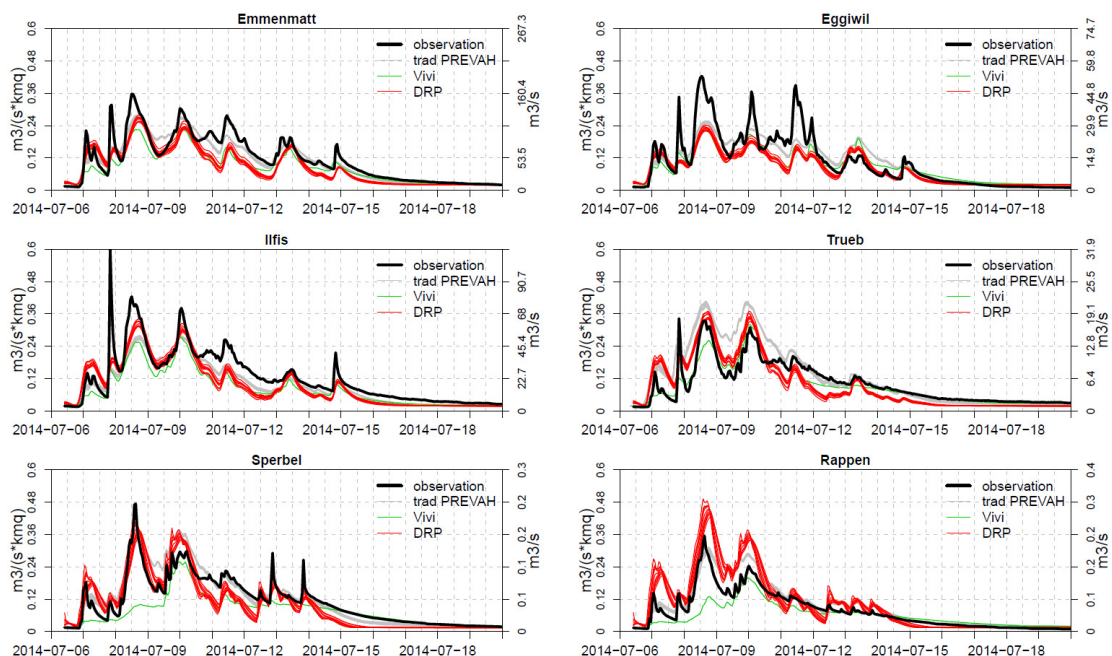


Abb. H9: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Teil-EZG. Die grauen Ganglinien wurden mit dem traditionellen PREVAH, die grünen Ganglinien mit dem Regionalisierungsverfahren nach Viroli et al. (2009b) und die roten Ganglinien mit dem prozessbasierten Modell simuliert.

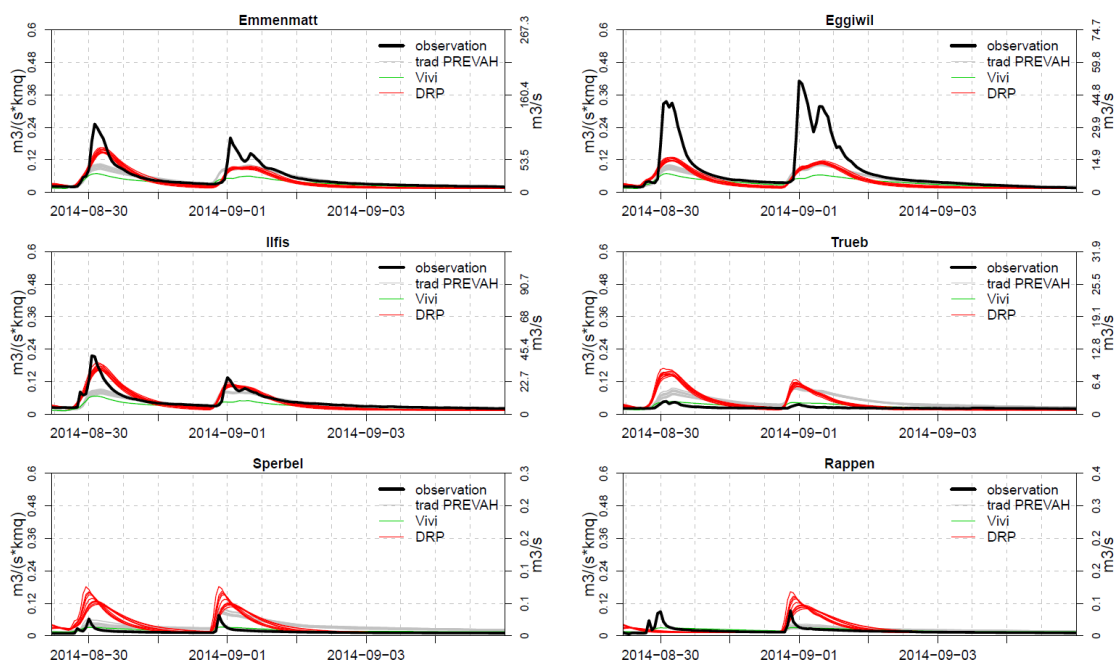


Abb. H10: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Teil-EZG. Die grauen Ganglinien wurden mit dem traditionellen PREVAH, die grünen Ganglinien mit dem Regionalisierungsverfahren nach Viroli et al. (2009b) und die roten Ganglinien mit dem prozessbasierten Modell simuliert.

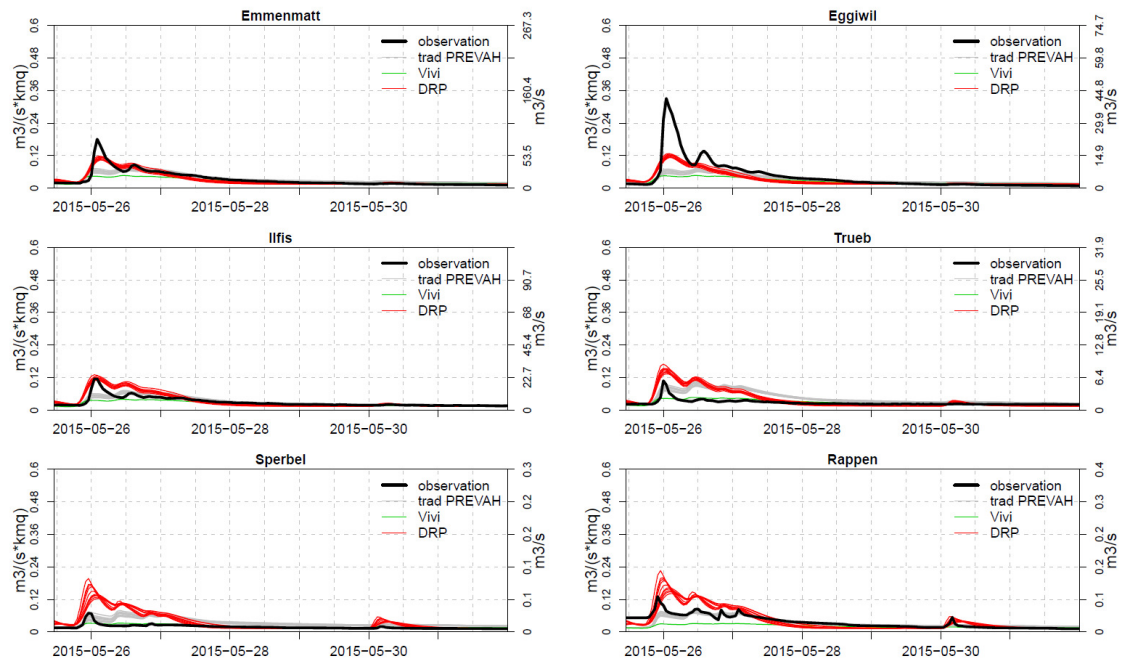


Abb. H11: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Teil-EZG. Die grauen Ganglinien wurden mit dem traditionellen PREVAH, die grünen Ganglinien mit dem Regionalisierungsverfahren nach Viroli et al. (2009b) und die roten Ganglinien mit dem prozessbasierten Modell simuliert.

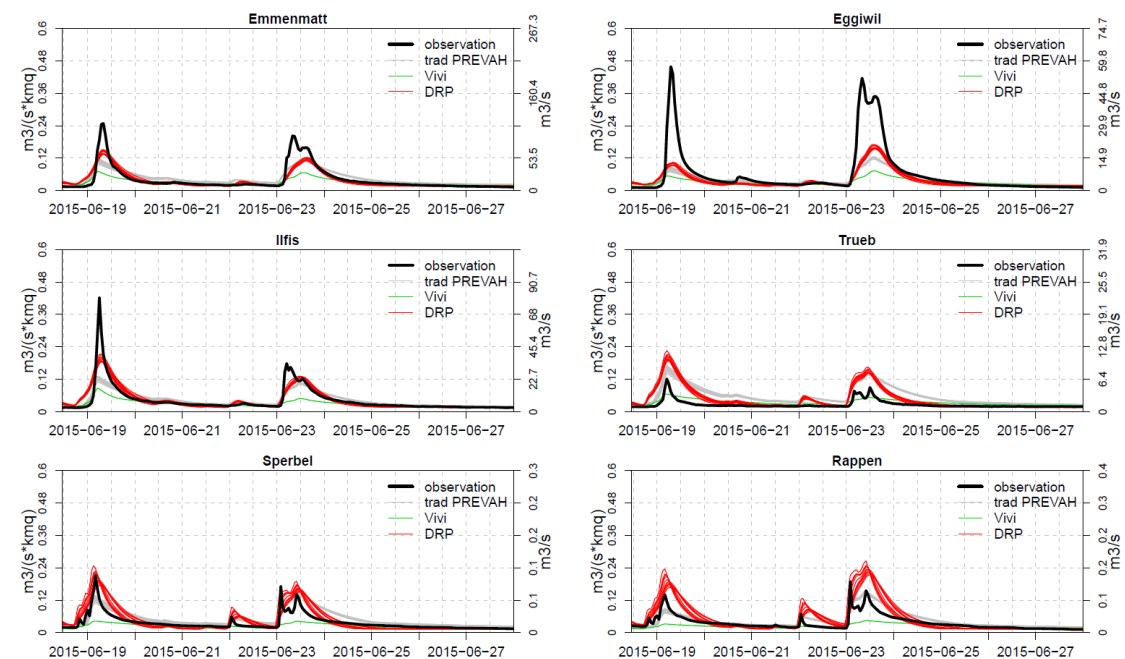


Abb. H12: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Teil-EZG. Die grauen Ganglinien wurden mit dem traditionellen PREVAH, die grünen Ganglinien mit dem Regionalisierungsverfahren nach Viroli et al. (2009b) und die roten Ganglinien mit dem prozessbasierten Modell simuliert.

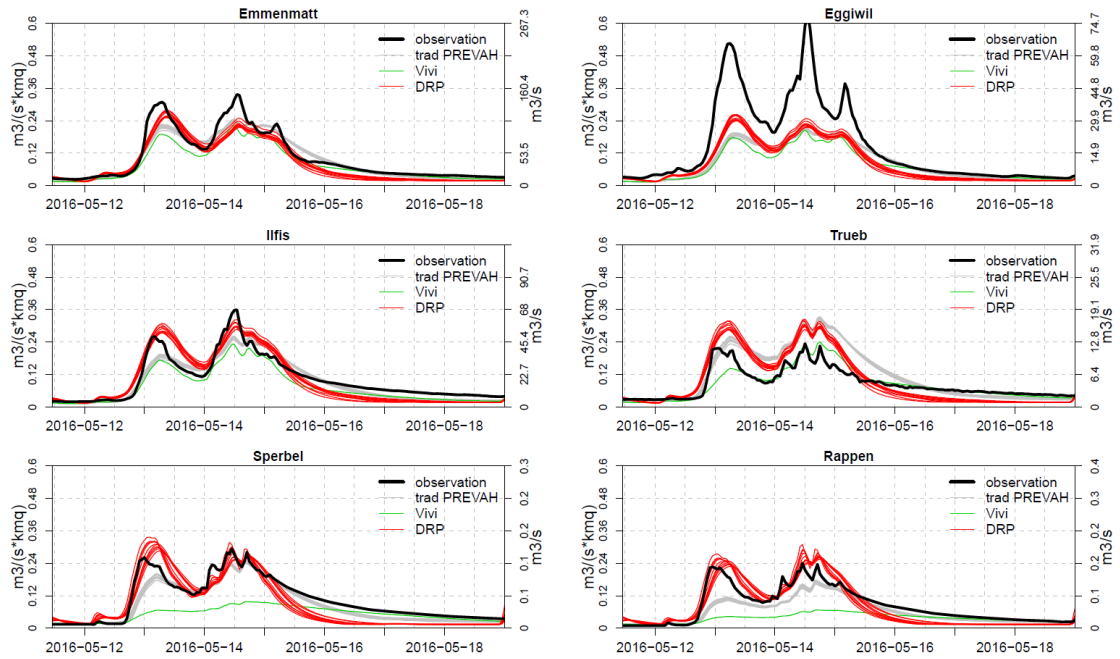


Abb. H13: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Teil-EZG. Die grauen Ganglinien wurden mit dem traditionellen PREVAH, die grünen Ganglinien mit dem Regionalisierungsverfahren nach Viroli et al. (2009b) und die roten Ganglinien mit dem prozessbasierten Modell simuliert.

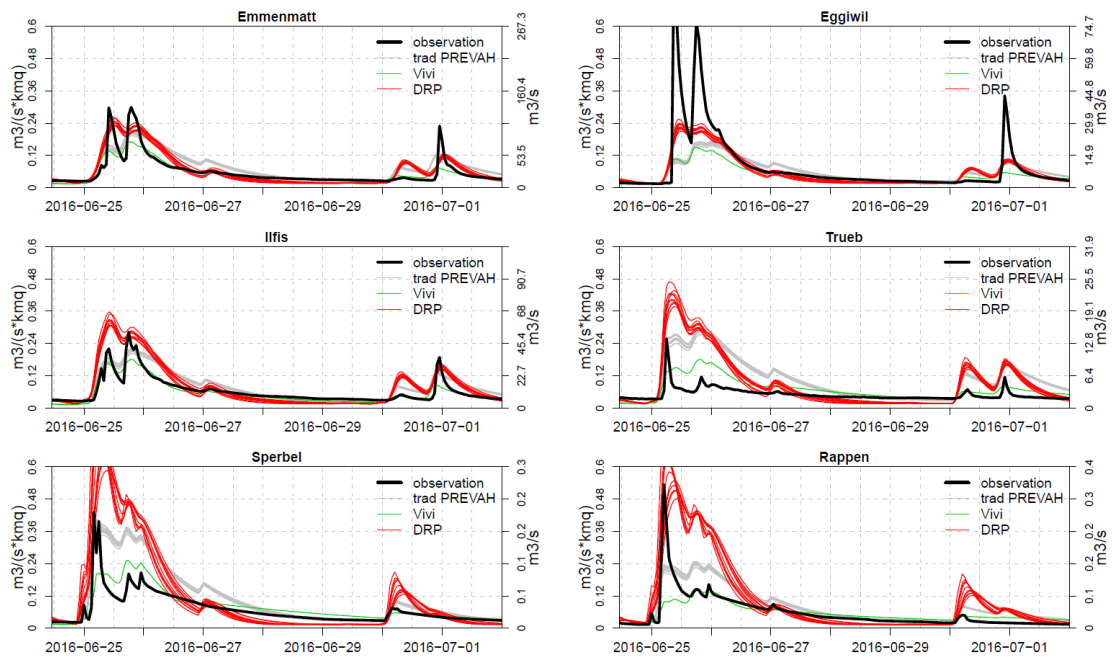


Abb. H14: Vergleich zwischen gemessenen (schwarz) und simulierten Ganglinien für das EZG der Emme bis Emmenmatt und dessen beobachteten Teil-EZG. Die grauen Ganglinien wurden mit dem traditionellen PREVAH, die grünen Ganglinien mit dem Regionalisierungsverfahren nach Viroli et al. (2009b) und die roten Ganglinien mit dem prozessbasierten Modell simuliert.



Mapping dominant runoff processes: an evaluation of different approaches using similarity measures and synthetic runoff simulations

Manuel Antonetti^{1,2}, Rahel Buss¹, Simon Scherrer³, Michael Margreth⁴, and Massimiliano Zappa¹

¹Swiss Federal Research Institute WSL, Birmensdorf, Switzerland

²Department of Geography, University of Zurich, Zurich, Switzerland

³Scherrer AG, Basel, Switzerland

⁴SoilCom GmbH, Zurich, Switzerland

Correspondence to: Manuel Antonetti (manuel.antonetti@wsl.ch)

Received: 20 November 2015 – Published in Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.: 18 December 2015

Revised: 20 May 2016 – Accepted: 28 June 2016 – Published: 20 July 2016

Abstract. The identification of landscapes with similar hydrological behaviour is useful for runoff and flood predictions in small ungauged catchments. An established method for landscape classification is based on the concept of dominant runoff process (DRP). The various DRP-mapping approaches differ with respect to the time and data required for mapping. Manual approaches based on expert knowledge are reliable but time-consuming, whereas automatic GIS-based approaches are easier to implement but rely on simplifications which restrict their application range. To what extent these simplifications are applicable in other catchments is unclear. More information is also needed on how the different complexities of automatic DRP-mapping approaches affect hydrological simulations.

In this paper, three automatic approaches were used to map two catchments on the Swiss Plateau. The resulting maps were compared to reference maps obtained with manual mapping. Measures of agreement and association, a class comparison, and a deviation map were derived. The automatically derived DRP maps were used in synthetic runoff simulations with an adapted version of the PREVAH hydrological model, and simulation results compared with those from simulations using the reference maps.

The DRP maps derived with the automatic approach with highest complexity and data requirement were the most similar to the reference maps, while those derived with simplified approaches without original soil information differed significantly in terms of both extent and distribution of the DRPs. The runoff simulations derived from the simpler DRP maps

were more uncertain due to inaccuracies in the input data and their coarse resolution, but problems were also linked with the use of topography as a proxy for the storage capacity of soils.

The perception of the intensity of the DRP classes also seems to vary among the different authors, and a standardised definition of DRPs is still lacking. Furthermore, we argue not to use expert knowledge for only model building and constraining, but also in the phase of landscape classification.

1 Introduction

Conceptual rainfall–runoff models perform well on gauged basins but appear to be limited in reproducing the hydrological behaviour of ungauged catchments (Hrachowitz et al., 2013). Expert knowledge about the different runoff processes that can occur on a catchment can improve the hydrological simulations for such ungauged basins. For example, it can be used to design process-tailored model structures aiming to be right for the right reason (Klemeš, 1986). Furthermore, it can help to reduce the need for calibration by constraining the parameter values or modelled output to guarantee consistency with the reality (Franks et al., 1998; Seibert and McDonnell, 2002; Gharari et al., 2014; Hrachowitz et al., 2014). Hydrological classifications based on landscapes with similar hydrological behaviour can be useful regionalisation tools for predictions in ungauged basins. In this case, once a

Table 1. List of hydrological classifications based on DRPs, the data they require, and the number of output classes (A: automatic; M: manual).

	Approach	Topography	Land use	Geology	Soil maps	Drainage maps	Forest–vegetation maps	Extensive field investigations	Number of output classes
Boorman et al. (1995)	A				x				29
Peschke et al. (1999)	A	x	x	x	x				7
Tilch et al. (2002)	M	x		x					6
Waldenmeyer (2003)	A	x					x		7
Scherrer and Naef (2003)	M	x	x	x	x	x	x	x	9
Schmocker-Fackel et al. (2007)	A	x	x	x	x	x	x	x	12
Tetzlaff et al. (2007)	A	x	x	x				x	5
Müller et al. (2009)	A	x	x	x					9
Gharari et al. (2011)	A	x							3
Hümann and Müller (2013)	A	x	x	x					10
Gao et al. (2014)	A	x	x						4

model structure and its parameters have been identified for each landscape in a gauged catchment, they are transferred to an ungauged catchment where the landscapes have similar hydrological behaviour (e.g. Beran, 1990; Mosley, 1981; Viviroli et al., 2009a).

In recent decades, several methods have been developed to quantify the spatial extent and to identify the distribution of areas where a specific runoff process occurs. The topographic wetness index (Beven and Kirkby, 1979), as an example of index-based methods, allows areas prone to saturation overland flow (SOF) to be identified using only topographical information. Similarly, Woods et al. (1997) developed a topographic index for areas where subsurface flow (SSF) occurs. Another well-established methodology involves the explicit definition of hydrological response units (HRUs), which can be identified according to geological, ecological, pedological, and/or topographical criteria (e.g. Ross et al., 1979; Flügel, 1995). For example, Markart et al. (2011) developed a method for assessing surface runoff coefficients and surface roughness in the case of extreme precipitation events. Similarly, Dobmann (2010) introduced a way to map runoff disposition, defined as “the tendency of water to become displaced downstream due to gravity in such a way as to cause damage” (Kienholz, 1998).

Although these methods represent an important basis for the determination of runoff peaks and return periods of flood events, they cannot reproduce the full range of runoff responses that can be observed on a site. To improve the HRU approach, several hydrological classifications have been developed based on the concept of dominant runoff process (DRP), i.e. the runoff generation mechanism that contributes most to runoff (Blöschl, 2001).

DRP classifications may be manual or automatic (Table 1). Manual approaches are based on extensive field investigations and the interpretation and upscaling of the results on expert knowledge (e.g. Scherrer and Naef, 2003). In contrast, automatic methods generally rely on GIS and on algorithms

based on simplifications of expert knowledge (e.g. Peschke et al., 1999).

Automatic approaches differ in which data they require. Some rely on topographical information only (e.g. Gharari et al., 2011), while others use all the available information for an area (e.g. Schmocker-Fackel et al., 2007). The data requirement is closely linked to the time it takes to map the DRPs, ranging from a few hours with simple data input to months if the data are derived from extensive field investigations (e.g. Tetzlaff et al., 2007).

The output classes of the classifications also differ. All methods distinguish at least between infiltration excess (Hortonian) overland flow (HOF) and SOF, and between SSF and deep percolation (DP) (e.g. Gharari et al., 2011; Gao et al., 2014). Several approaches also provide information on the intensity of the SOF and SSF processes, where the numbers from 1 to 3 represent the delay in their reaction to rainfall, with 1 representing an almost immediate reaction, 2 a slightly delayed one, and 3 a strong delayed one (e.g. Scherrer and Naef, 2003; Schmocker-Fackel et al., 2007; Müller et al., 2009; Hümann and Müller, 2013). Boorman et al. (1995), however, classified expected hydrological behaviour according to 29 classes in the Hydrology Of Soil Types classification of Great Britain.

Several algorithms have been developed exclusively for specific catchments, and are therefore not suitable for regionalisation purposes. For instance, Tilch et al.’s (2002) classification is based on the genesis of the hillslope and its covering material. Similarly, Waldenmeyer (2003) determined DRPs from a forestry site map, and Gao et al. (2014) linked the presence of forest to the hillslope exposition in the barely inhabited upper Heihe catchment in China. These simplifications limit the applicability of the methods to other catchments.

All these methods aim to map the spatial distribution of DRPs in a realistic way, but only a few have investigated the transferability of the algorithms to other catchments. Furthermore, it remains unclear how the different time and data re-

quirements of the mapping approaches affect hydrological simulations. The objective of this paper is therefore to (i) test the suitability of different automatic DRP-mapping approaches for mapping ungauged catchments, and to (ii) quantify the uncertainty of hydrological simulations due to different spatial representations of DRPs.

DRP maps were produced for two catchments on the Swiss Plateau using the automatic approaches of Schmocker-Fackel et al. (2007), Müller et al. (2009), and Gharari et al. (2011). These were then compared with reference maps produced using manual mapping according to Scherrer and Naef (2003). To assess how similar the automatically derived DRP maps are to the reference maps, a measurement of agreement, Fuzzy Kappa (Hagen-Zanker, 2009), a measurement of association, Mapcurves (Hargrove et al., 2006), and a class comparison were carried out. Furthermore, the effects of the differences between the DRP maps on synthetic runoff simulations were investigated with an adapted version of the well-established PREVAH model (Viviroli et al., 2009b).

2 Study sites

Our analyses are performed on two small catchments on the Swiss Plateau. Dorfbach Meilen is a creek which drains a 4.6 km² catchment and flows into Lake Zurich (Fig. 1). The elevation of the catchment ranges from 409 to 850 m a.s.l. It is mainly covered by grassland (49.4 %) and forest (39 %) and, to a lesser extent, arable land (3.6 %) and settlements (8 %). The basin is characterised by the Upper Freshwater Molasse, with conglomerate in the shallow subsurface (Hantke et al., 1967). A large part of the catchment is covered by brown-earth soils with normal permeability and storage capability. Soils with less permeable soils and wetlands are less widespread but play an important role in runoff generation.

The Reppisch catchment up to Birmensdorf is situated in the south-west of the Canton of Zurich, Switzerland (Fig. 2). It has an area of 22 km², of which 48 % is covered by forest, 42 % by grassland, and 7 % by settlements. The elevation of the catchment ranges from 467 to 894 m a.s.l. The geological substructure of the catchment forms the Upper Freshwater Molasse, composed of sandstone and marl, and is covered in most cases by glacial sediments (Hantke et al., 1967; Pavoni et al., 1992; Bolliger et al., 1999). Gravel deposits can be found along the Reppisch River, while a number of smaller alluvial fans were accumulated by its many tributaries. Brown-earth soils with normal permeability and storage capability cover most of the catchment, while soils with low permeability are less widespread.

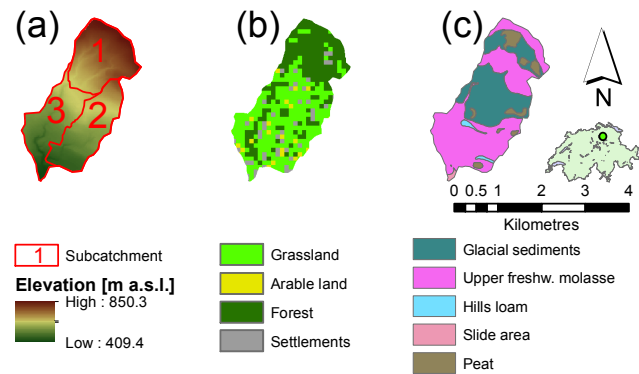


Figure 1. Overview of the Meilen catchment, Switzerland. (a) Digital terrain model (25 m resolution) subdivided into three sub-catchments; (b) land-use map (100 m resolution); (c) geology map (data: BFS GEOSTAT/Federal Office of Topography swisstopo).

3 Data and methods

3.1 DRP-mapping approaches

Manually derived DRP maps based on the decision scheme of Scherrer and Naef (2003), referred to here as SN03 maps, are available as shape files for both study sites and were used as reference maps (Figs. 3a and 4a). These DRP maps are developed in different steps as follows. (1) Information about the land use, vegetation, soil, geology, hydrogeology, and topography of the catchment is collected. (2) Based on these data, the DRPs are initially estimated using expert knowledge, and locations where estimations are not straightforward are identified. (3) On these sites, soil profiles are investigated and the DRP at the plot sites identified according to the decision schemes for long-lasting events, i.e. with precipitation intensity less than ca. 20 mm h⁻¹, of Scherrer (2006). (4) After the analysis of the field investigations, the DRPs can be determined for the hillslopes and finally for the whole catchment. (5) The DRPs are reclassified into five different runoff types (RTs) with respect to the runoff intensity (Table 2).

Schmocker-Fackel et al. (2006) developed a strategy to simplify the decision schemes of Scherrer and Naef (2003) and determine the DRPs automatically within a GIS environment. Basically, the method relies on a soil map with high resolution (1 : 5000) of the Canton of Zurich and information about the soil water regime, soil depth, and the soil's physical and chemical properties. Where information on soil is lacking, an expert-based soil prediction model was used to derive DRPs from information about forest communities, the slope and shape of hillslopes, the surface water network, and the geology (Margreth et al., 2010). This step is relatively time-consuming, since the soil prediction model has to be adapted to each catchment according to the information available. Therefore, several days of fieldwork are necessary. The DRP maps derived with this approach for this study are

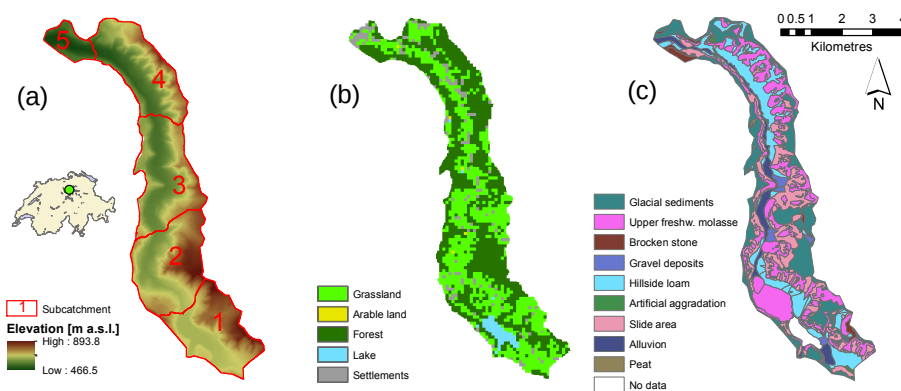


Figure 2. Overview of the Reppisch catchment, Switzerland. (a) Digital terrain model (25 m resolution) subdivided into five sub-catchments; (b) land-use map (100 m resolution); (c) geology map (data: BFS GEOSTAT/Federal Office of Topography swisstopo).

Table 2. Reclassification of DRPs according to runoff types (HOF: Hortonian overland flow; SOF: saturation overland flow; SSF: sub-surface flow; DP: deep percolation; 1 represents an almost immediate reaction, 2 a slightly delayed one, and 3 a strongly delayed one). Adapted from Naef et al. (2000).

Runoff type (RT)	DRP	Runoff intensity
1	HOF1/2, SOF1	Fast
2	SOF2, SSF1	Slightly delayed
3	SSF2	Delayed
4	SOF3, SSF3	Strongly delayed
5	DP	Not contributing

available as shape files, referred to hereafter as SF07 maps (Figs. 3b and 4b).

Müller et al. (2009) proposed a further simplification of Schmocker-Fackel et al.'s (2007) approach based on GIS and valid for prolonged rainfall events. The method combines information on the permeability of the geological substratum, land use, and slope, but excludes soil information. It results in the same DRP classes as those proposed by Scherrer and Naef (2003), and involves, first, using a DTM analysis to identify classes of slopes; then, classifying the geological substrata of the catchments as either permeable or impermeable; and finally, combining the pre-processed digital data to obtain the DRP (Table 3). Hümann and Müller (2013) extended the approach proposed by Müller et al. (2009) to forested areas and to different event types. Since the reference maps refer to long-lasting events, Müller et al.'s (2009) approach was used in this study.

DRP maps based on Müller et al. (2009), referred to here as MU09 (Figs. 3c and 4c), were derived for the two study sites with a spatial resolution of 25 m based on the following assumptions. (i) Riparian zones, i.e. the spots around the river network, were classified as SOF1. The extension of these areas was defined by taking into consideration the cells with a height above the nearest drainage (HAND), i.e. the height of

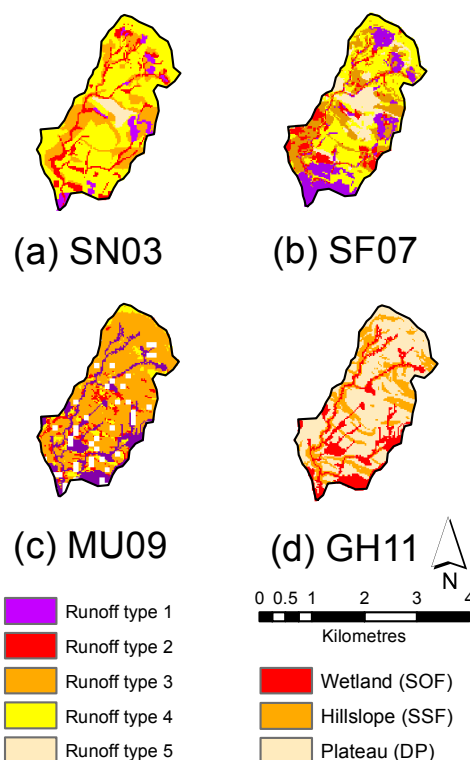


Figure 3. DRP maps for the Meilen catchment: (a) reference map according to Scherrer and Naef (2003) and automatically derived map according to (b) Schmocker-Fackel et al. (2007), (c) Müller et al. (2009), and (d) Gharari et al. (2011).

a DTM cell less the elevation of the river network where the cell drains (Rennó et al., 2008), that is, lower than 1.2 m. (ii) Settlement areas were not considered in the current study as the resolution of the land-use map used (100 m) was not high enough to obtain a realistic representation of their spatial distribution.

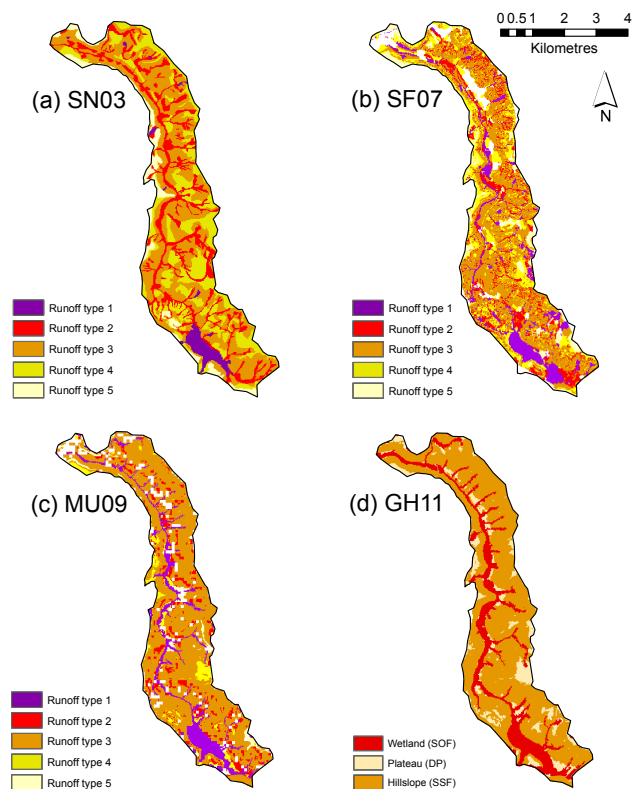
Table 3. Dependency of the DRP on the slope and permeability of the substratum for grassland, arable land and forest, according to Müller et al. (2009).

Slope (%)	Impermeable substratum		Permeable substratum
	Grassland and arable land	Forest	Grassland, arable land, and forest
0–3	SOF3	SOF3	DP
3–5	SOF2	SSF3	DP
5–20	SSF2	SSF2	DP
20–40	SSF1	SSF2	DP
> 40	SSF1	SSF1	DP

As a further simplification, topography-based classifications were developed with the assumption that the topography can be seen as a proxy for the geology, soil, land use, climate and, consequently, DRPs (Savenije, 2010). In addition to traditional topographical descriptors (e.g. elevation, slope, and exposition), these methods are based on the HAND value, which represents, in turn, a rearrangement of the “elevation-above-stream” proposed by Seibert and McGlynn (2006). HAND-based classifications have been used to define classes of soil water environments, where a single runoff generation mechanism dominates (Nobre et al., 2011; Gao et al., 2014). Gharari et al. (2011) found that the combination between HAND and slope provided the most suitable descriptors for a topography-based classification of DRPs. The mapping approach distinguishes between three landscape classes. Areas below a certain HAND threshold value are called “wetland” (subject to SOF). The remaining regions are further divided into two classes: “hillslope”, subject to SSF, and “plateau”, subject to DP, depending on whether the slope is above or below a certain threshold value. Since these threshold values are not unconditionally transferable to other catchments, a sensitivity analysis was carried out on both study sites. Different combinations of threshold values were tested, and the resulting maps were compared with SN03 at a spatial resolution of 25 m. We selected the maps with the best Mapcurve score (cf. Sect. 3.2) for this study, and refer to them as GH11 (Figs. 3d and 4d). The threshold values obtained are in agreement with those of Gharari et al. (2011) in a central European catchment (Fig. A1).

3.2 Map comparison

To test the suitability of different approaches for automatically mapping the DRPs on ungauged catchments, a class comparison between automatically derived DRP maps and the reference maps was carried out for the two study sites. The percentage of total catchment area assigned to each RT, and the percentages of discrepancy between the RTs in the automatic DRP maps and those in the reference maps were calculated. To deal with the difference in the number of classes between the GH11 maps and reference maps, an expedient step was introduced. Since none of the three classes

**Figure 4.** DRP maps for the Reppisch catchment: (a) reference map according to Scherrer and Naef (2003) and automatically derived map according to (b) Schmocker-Fackel et al. (2007), (c) Müller et al. (2009), and (d) Gharari et al. (2011).

of GH11 maps (wetland, hillslope, and plateau) is necessarily comparable to a specific class of the reference maps, the five RTs of the SN03 maps were reclassified into three classes covering every possible combination (Table A1), resulting in six new reference maps. These were compared one by one with the GH11 maps. In addition, the discrepancies between the MU09 maps and the reference maps were highlighted in a deviation map to identify the spots where the difference in the RTs is greater than 2 and to help identify the possible causes of incorrect mapping.

To account for fuzziness in the definition of the RTs, a measure of agreement, fuzzy kappa (K_{Fuzzy}), was used. The method was proposed by Hagen-Zanker (2009) to extend the well-established Cohen kappa (Cohen, 1960) and to take into account the fuzziness of categories, allowing some pairs of classes to be more similar than others, as well as the fuzziness of location, given that cells tend to be at least slightly spatially correlated. To take the fuzziness of categories into account, a similarity matrix was defined, where each pair of classes was assigned a number between 0 (totally distinct) and 1 (completely identical). The extent to which neighbouring cells influence the cell in question is defined by a distance decay function. An overall measure of similarity between two maps can be obtained by using the following equation:

$$K_{\text{Fuzzy}} = \frac{P - E}{1 - E} [-], \quad (1)$$

where P represents the mean agreement of the two compared maps weighted by the expected agreement E . K_{Fuzzy} ranges from 0 (fully distinct maps) to 1 (fully identical maps). For this study, the fuzzy kappa algorithm implemented in the Map Comparison Kit 3 software (Visser and de Nijs, 2006) was used. We assumed that contiguous RTs are similar to some extent, and the corresponding degree of similarity was set to 0.25. An exponential decay function with a halving distance of one cell is adopted.

Given that the number of classes in the GH11 map is different from that in the reference maps, the goodness-of-fit (GOF) measure called Mapcurves (Hargrove et al., 2006) was used to quantify the degree of spatial concordance between the automatic DRP maps and the reference maps. For each of the existing classes in two maps, a GOF score (unitless) was calculated according to the following equation:

$$\text{GOF}_X = \sum_{Y=1}^n \left(\frac{C}{A} \cdot \frac{C}{B} \right), \quad (2)$$

where A is the total area (m^2) of a given class X on the map being compared, B is the total area (m^2) of a class Y on the reference map, C is the intersecting area (m^2) between X and Y when the maps are overlaid, and n is the total number of classes on the reference map. The sum of this product gives a GOF value for a particular class. The overall Mapcurves (MC) score is given by the area under the curve obtained by plotting the GOF scores on the abscissa and the percentage of map classes with a GOF score larger than a particular value on the ordinate. An MC score of 1 represents a perfect fit, while an MC score of 0 means that there is no spatial overlap between the classes of two maps. Both the shapes of the Mapcurves and MC scores differ when the compared map is used as a reference map. This is because the MC score depends on the average size and number of the patches in each class of the maps being compared. Hargrove et al. (2006) argue that the combination of compared map and reference map that has the highest MC score must be chosen. However,

by doing so, the coarser maps would be advantaged. Therefore, for this study, SN03 maps were always set as reference maps. A detailed description of the two similarity measures is reported in Hagen-Zanker (2009) and Hargrove et al. (2006), while applications in hydrology are described in Speich et al. (2015) and Jörg-Hess et al. (2015).

To identify those landscapes where automatic approaches perform better, the comparison measures were applied to the single sub-catchments, at a high spatial resolution, to take into account the added value of the finest maps. For this reason, the shape files were rasterised and the coarser maps were resampled to a grid resolution of 2 m.

3.3 Synthetic runoff simulations

To assess how the differences between the automatic DRP maps affect a hydrograph, synthetic runoff simulations were carried out. This approach was inspired by Weiler and McDonnell (2004), who suggested using numerical experiments to isolate hypotheses and investigate their influence on the model output. In a recent review paper, Fatichi et al. (2016) acknowledge these studies to be different from the ones aiming at comparing performances of different models or validating model results. The word “synthetic” implies therefore that the focus is exclusively on how the different DRP maps influence the simulated runoff, and not on how well the model reproduces a measured discharge. The model used for this study is an adapted version of the runoff generation module of the PREVAH model (Viviroli et al., 2009a). It is distributed (500 m grid resolution) to take into account the spatial variability of the input data, which consists of a combination of radar and traditionally measured rainfall data (Sideris et al., 2014). For each cell, the percentage of each RT is taken into account to avoid losing information because of the grid resolution.

The model does not take interception, evapotranspiration, and soil moisture into consideration (Fig. 5). The rainfall directly recharges the upper zone (unsaturated) runoff storage (SUZ), where the storage times for the surface runoff (K0H) and subsurface runoff (K1H) regulate the generation of the runoff. The threshold for quick runoff formation (SGR-LUZ) determines the separation between surface runoff (R0) and subsurface runoff (R1). A maximum percolation rate (CPERC) controls the percolation to the groundwater storage, which is divided into a quick-leaking storage (SLZ1) and two slow-leaking storages (SLZ2 and SLZ3; Schwarze et al., 1999). The storage capacity of SLZ1 is limited by a maximal storage charge (SLZ1MAX), while its contribution to the slow runoff (R2) is regulated by the storage time for quick baseflow (CG1H). SLZ2, which only receives the fraction of percolation not absorbed by SLZ1, is controlled by the storage time for slow baseflow (K2H). With this model configuration, it is possible to detect the effects of differences between the different maps in terms of both extent and distribution of RTs. The difference in extent of RTs gives more

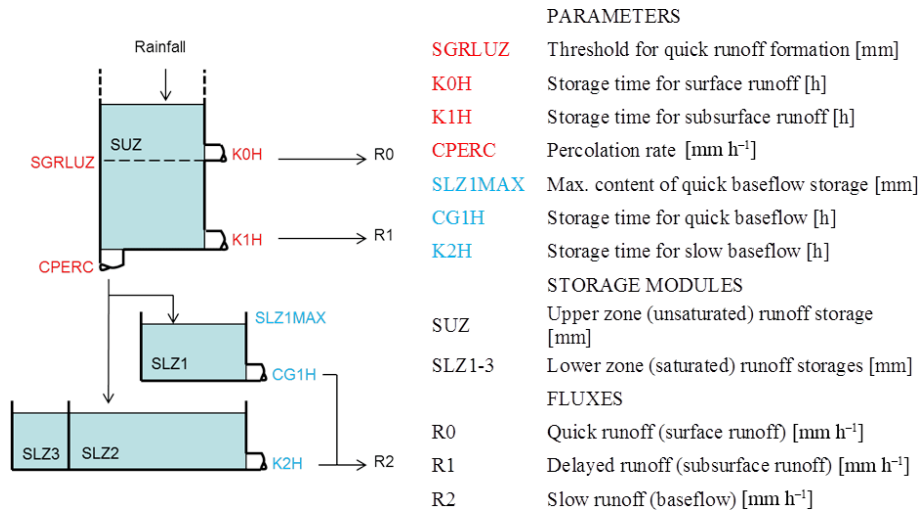


Figure 5. Runoff generation module of PREVAH, adapted from Viviroli et al. (2009b). Parameters in blue are averaged for the whole catchment, while parameters in red are adapted stepwise to the RTs.

weight to one or another of the parameter sets. If the RT extent is the same, the location of the RTs on the catchment plays a role, since the rainfall input can vary from cell to cell.

We assume that the properties of the different RTs can be represented by varying the parameter values of the model employed. For example, the tendency for RT1 and RT2 to generate overland flow was represented by assigning low values of SGRLUZ and CPERC. Furthermore, the K0H values assigned to RT1 and RT2 were set as low since the fast contributing areas were assumed to be close to the river network. In areas where either HOF or DP dominates, the subsurface flow was neglected and K1H was set to higher values (e.g. 1000 h). As the baseflow generation does not necessarily depend on the RTs, the parameters of the SLZ1, SLZ2, and SLZ3 were defined a priori as averaged values for both catchments and kept constant for the simulations. The values selected were based on the results of Viviroli et al. (2009a), who identified a range of suitable values for each parameter of PREVAH for flood estimation in ungauged mesoscale catchments in Switzerland.

To investigate the sensitivity of the model output with respect to the definition of parameter values based on the RTs, the parameters were defined in a stepwise process, resulting in 16 different parameter combinations (Table A2). First, the five RTs were assigned the same set of parameter values and no information about the RTs was thus included. In the second step, the value of each parameter controlling the SUZ was defined with respect to the RT one at the time, and the value of the other parameters was left unchanged. The same procedure was then repeated by defining the values based on the RTs of two, three, and finally all the parameters at the same time. As in the class comparison (see Sect. 3.2), an expedient step was introduced to take into account the fact that

there were fewer classes of GH11 maps. Every possible combination of the five predefined values for each parameter was covered, provided that the parameters fulfilled the following condition:

$$\vartheta_{\text{WETLAND}} \leq \vartheta_{\text{HILLSLOPE}} \leq \vartheta_{\text{PLATEAU}} \quad (3)$$

$$\vartheta = \text{SGRLUZ, K0H, K1H, CPERC.}$$

This resulted in 10 different runs for each parameter combination (Table A3), with one exception: the storage time for the subsurface flow K1H. This was set at 1000 h for wetland (SOF) and plateau (DP), since no subsurface flow was expected there.

Synthetic simulations were carried out on the two study sites over the time period which ranges from 16 June 2014 to 15 August 2014. A modified version of the Nash–Sutcliffe efficiency (NSE; Nash and Sutcliffe, 1970), in which the observed runoff is replaced by the runoff simulated with the reference maps, was therefore used as an objective function (Eq. 4).

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{SN03},i} - Q_{\text{DRP},i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{SN03},i} - \overline{Q_{\text{SN03}}})^2} [-] \quad (4)$$

$$\text{DRP} = \text{SF07, MU09, GH11.}$$

4 Results

According to the reference (SN03) maps, the two study sites differ slightly in their RT distributions (Fig. 6). In the Repisch catchment, areas with a delayed runoff contribution

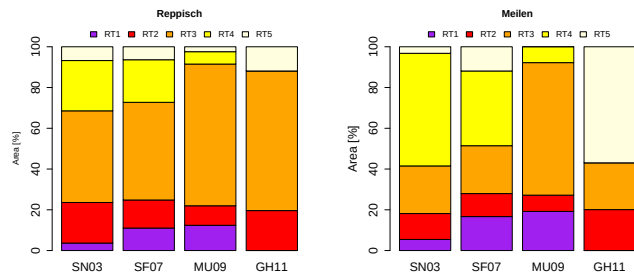


Figure 6. Percentage of total catchment area assigned to each runoff type in the Reppisch and Meilen catchments with the four different mapping approaches.

(RT3) prevail (45 % of the catchment area), while, in the Meilen catchment, areas with a strongly delayed runoff contribution (RT4) cover 55.3 % of the catchment. SF07 maps reproduce the RT distribution fairly, although they slightly overestimate the fast contributing areas (RT1) and underestimate the areas with a strongly delayed contribution (RT4) in the Meilen catchment. The RT distributions of the MU09 maps deviate from the one of the reference maps. They considerably overestimate the delayed contributing areas (RT3) and, to a lesser extent, the fast ones (RT1), at the expense of the remaining RTs. The runoff contribution is consistently overestimated, especially in the Meilen catchment, whereas in 64 % of the whole catchment the RT is faster compared with the SN03 map (Fig. 7).

The distribution of landscape classes of GH11 maps in the Meilen catchment (Fig. 6b) agrees well with the reference map, if the landscape class “hillslope” is assumed to correspond to RT3, “wetland” to the union of RT1 and RT2, and “plateau” to both RT4 and RT5. However, this consideration no longer holds true in the Reppisch catchment, where the percentage of the total catchment mapped as “hillslope” (68 %) markedly exceeds the one mapped as RT3 in the reference map (45 %). Considering each possible reclassification into three classes of the five RTs of the SN03 maps (Table A1), the GH11 maps, on average, estimate the runoff contribution to be lower than the SN03-map estimate (Fig. 7).

Figure 8 shows a map of the Reppisch catchment highlighting areas where the discrepancy between the RTs in the MU09 map and the SN03 map is higher than 2 (Table 4). The RT assigned to area 1 is too fast as the glacial sediments were assumed to be always impermeable. Similarly, area 3 was mapped as a non-contributing area as the alluvium was assumed to be always permeable. However, previous investigations showed the local permeability of the glacial sediments was high, and the one of the alluvium was low due to clayish sediments (Scherrer AG, 2006). Area 2 is located on a steep hillslope and is therefore mapped as contributing with a slight delay. In contrast, area 4 is on a flat plateau, so that its contribution to the runoff was assumed to be strongly delayed. However, field investigations found the soil was very thick, indicating a high storage capacity in area 2. In contrast,

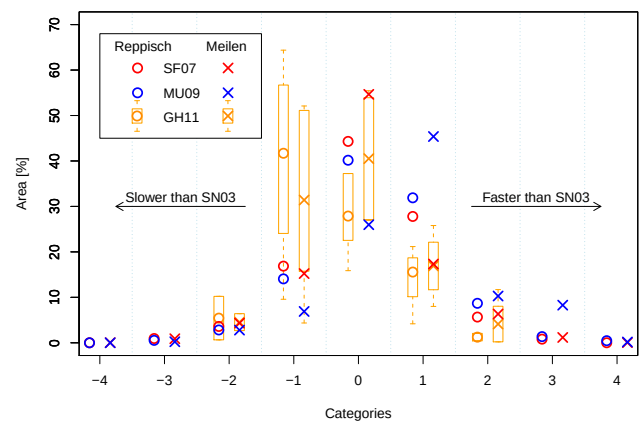


Figure 7. Distribution of the class deviations of the different automatic mapping approaches from the reference maps (circles refer to the Reppisch catchment and crosses to the Meilen catchment). The boxplots show median and interquartile ranges from the comparison between GH11 maps and the reclassified reference maps.

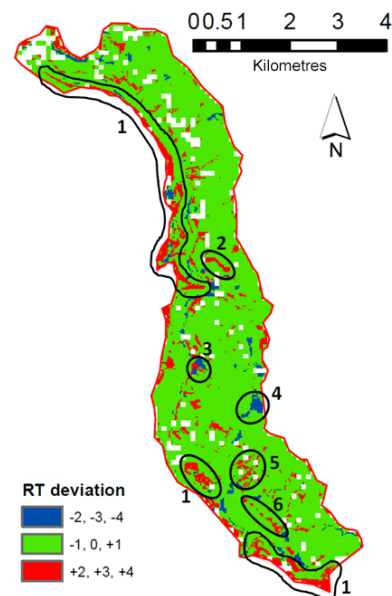


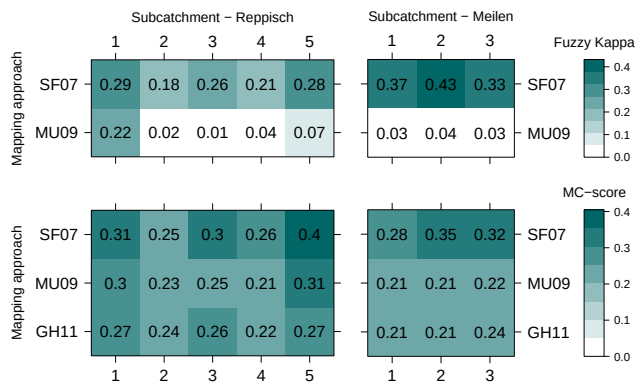
Figure 8. Deviation map between the MU09 map and the reference map. In the numbered areas the runoff contribution was either overestimated (red) or underestimated (blue).

the mixture of brown earth, stagnosol, and gleysol resulted in a low storage capacity in area 4 (Scherrer AG, 2006). In area 5, the river network derived with the DTM analysis differs considerably from the actual river path. The runoff contribution there was therefore overestimated by MU09. Similarly, the runoff contribution of area 6 was overestimated because the depiction of the lake was wrong due to the coarse resolution of the land-use map.

The measures of association and agreement obtained by comparing the automatically derived DRP maps with the reference maps for the sub-catchments of the two study areas

Table 4. List of areas identified in Fig. 8 with the automatically and manually derived DRPs (RTs), and a possible explanation for their deviation.

Area	DRP (RT) on MU09 map	DRP (RT) on SN03 map	Explanation
1	SSF2 (RT3)	DP (RT5)	Moraine not necessarily impermeable
2	SSF1 (RT2)	SSF3 (RT4)	Although high slope, high storage capacity of soil
3	DP (RT5)	SSF2 (RT3)	Alluvium not necessarily permeable
4	SOF3 (RT4)	SOF2 (RT2)	Although low slope, low storage capacity of soil
5	SOF1 (RT1)	SSF2 (RT3)	Coarse resolution of DTM
6	SOF1 (RT1)	SSF2 (RT3)	Coarse resolution of land-use map

**Figure 9.** Agreement scores K_{Fuzzy} and MC scores obtained by comparing the maps derived with automatic mapping approaches SN07, MU09, and GH11 with the reference (SN03) maps for the sub-catchments of the two study areas.

differ (Fig. 9). The scores of the SF07 maps are higher than those obtained by the comparison of MU09 maps and GH11 maps with the reference maps. The highest scores in the Reppisch catchment were in sub-catchment 1 due to the presence of a lake, which is mapped as RT1 in every mapping approach. As the values of the MC score obtained with MU09 maps and GH11 maps are nearly equal, these two mapping approaches seem to be interchangeable for both of the study areas.

Comparing the MC scores for each RT reveals which RTs can be clearly identified by the automatic mapping approaches (Fig. 10). The higher MC scores for classifications with the same number of classes should ideally be located along the main diagonal of the output matrices, meaning that each RT of an automatically derived DRP map is spatially best associated with its equivalent in the reference map. This is mainly the case for the SF07 maps, with the exception of the fast RT1 and RT2. These are identified as more similar to the next slower RTs of the reference maps. The MU09 maps's overestimation of the general runoff intensity of the whole catchment can be attributed to RT2 and RT4 in the Reppisch catchment and RT1 and RT3 in the Meilen catchment. These were spatially associated with the next slower RTs of the reference map. On both study sites, landscape

classes “wetland”, “hillslope”, and “plateau” of the GH11 maps fit best with RT2, RT3, and RT4 of the reference maps, respectively.

Since the extent and distribution of areas with the same RT differ, using automatically derived DRP maps in runoff simulations affects the results of the simulations themselves (Fig. 11). Simulations driven by the SF07 maps showed the smallest deviation in comparison with simulations driven by the SN03 maps. The tendency of the MU09 maps to overestimate the runoff contribution (Fig. 7) led to higher peaks in the Meilen catchment since overland flow was activated in areas with delayed runoff contribution during the two heavy rainfall events on 21 July 2014 and 10 August 2014 (Fig. 12). This did not happen in the Reppisch catchment as the precipitation intensity in the catchment was lower. The GH11 maps were very sensitive to the storage time for subsurface flow K1H due to the consistency assumption; that is, no interflow is expected in wetland and plateau areas, which are prone to SOF and DP, respectively. As a result, too much water remained in the storage and runoff peaks were mostly underestimated.

5 Discussion

One of the main purposes of this study was to test how well automatic approaches can map small catchments. The most complex automatic DRP map, i.e. the one derived according to Schmocker-Fackel et al. (2007), proved to be most similar to the reference maps derived manually with Scherrer and Naef (2003), according to both the class comparison and the similarity measures. This result is not surprising, considering that the method of Schmocker-Fackel et al. (2007) was developed for the Canton of Zurich, where the two catchments of the present study are located. However, the method was successfully tested also outside the Canton of Zurich (e.g. on the Swiss Prealps, Scherrer et al., 2013).

The DRP maps derived with simplified mapping approaches that included no soil information differed significantly in terms of both the extent and distribution of the DRPs from the reference maps. These differences are clearly linked to the quality of the input data. Geological maps are often not fine enough to depict geological formations and

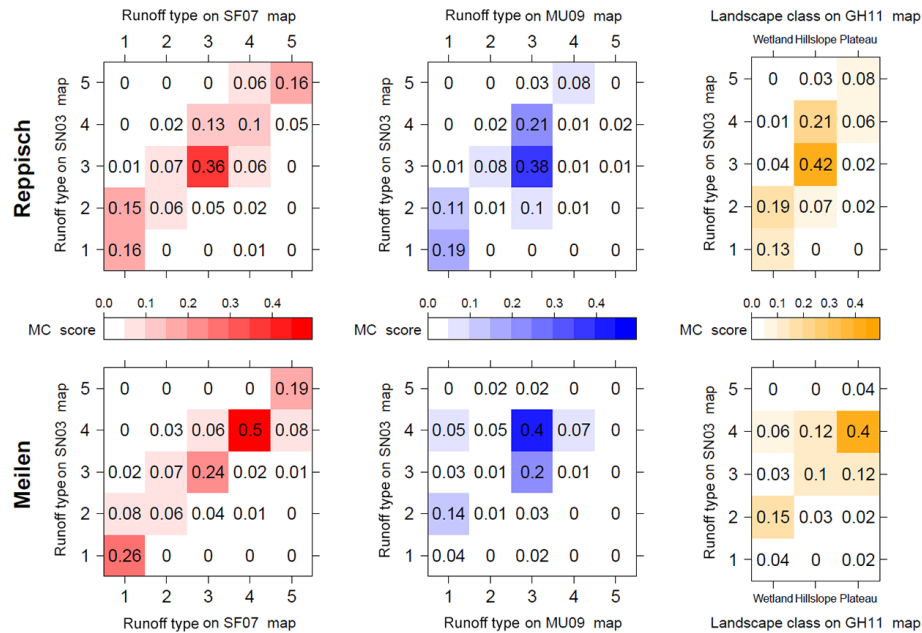


Figure 10. MC scores related to each RT obtained by comparing the maps derived with automatic mapping approaches SN07, MU09, and GH11 with the reference (SN03) maps for the two study sites.

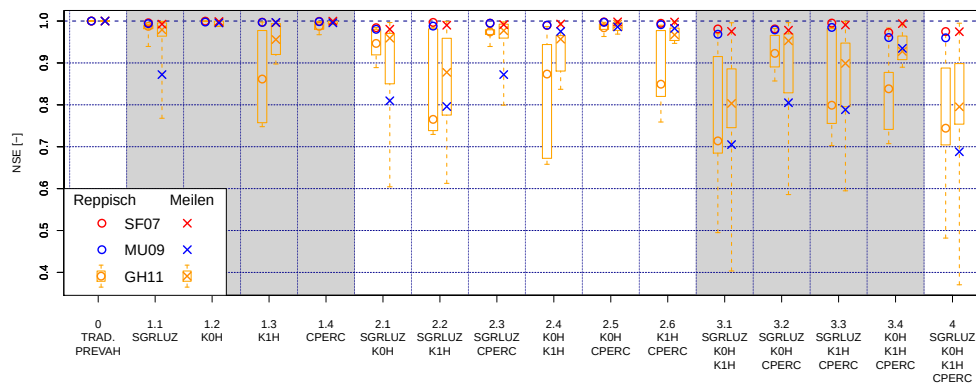


Figure 11. Modified NSE obtained by comparing the runoff simulated with the automatic DRP maps with that simulated with the reference maps, in the two study sites (simulation period 16 June 2014–15 August 2014). The boxplots show the medians and the interquartile ranges of the simulations driven by GH11 maps, while the labels on the abscissa show the model parameters whose values were defined based on the RTs.

possible variations in permeability within the same formation. Furthermore, if the resolutions of the DTM and the land-use map are too coarse, significant biases may result. However, using input data with high resolution would not necessarily improve the results if the classification concept itself is too coarse and generic. Since topography does not seem to be a good proxy for the storage and infiltration capacity of the soils on the study sites, the approaches developed by Müller et al. (2009) and Gharari et al. (2011) often overestimated the runoff intensity on steep sites and underestimated it on flat sites. These approaches were developed on basins, located in Rhineland-Palatinate (Germany) and in the Grand Duchy of Luxembourg, with different soil properties and event charac-

teristics than those investigated for this study. However, the adaptation of these classifications to the characteristics of our study sites (e.g. by adding or removing input data and modifying the classification criteria accordingly) was beyond the scope of this study.

The high MC scores obtained by certain pairs of different RTs (Fig. 9), as well as the visual inspection of the DRP maps, suggest that the perception of the intensity of DRPs varies among different authors. For example, the riparian zones on the reference maps were mostly mapped as RT2, but, where they were completely saturated and at least slightly sloped, they were mapped as RT1. In contrast, on MU09 maps and on SF07 maps, the riparian zone was mostly

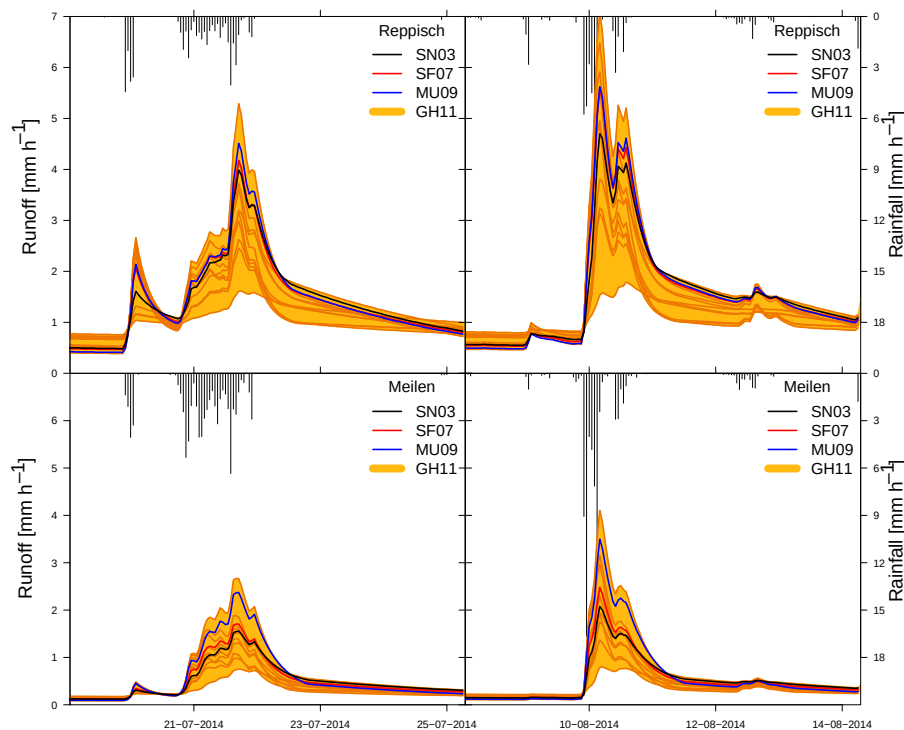


Figure 12. Simulated runoff during the two heaviest rainfall events of the simulation period, obtained from the different DRP maps for the two study sites by varying the parameter values for each RT (simulation 4.1 of Table A2). The bands represent the minimum and maximum runoff values obtained with the different parameter combinations for the simulations driven by GH11 maps.

mapped as RT1. Similarly, areas prone to DP on GH11 maps fitted best with RT4 areas of the reference maps, which represent areas where strongly delayed SOF or SSF, but not DP, occur. Since a straightforward, standardised definition of DRPs is missing, not only do the classification criteria vary, but also the classes. This can be misleading, especially if different classes have the same DRP names.

The MC-score ranking of the automatic mapping approaches is similar to the fuzzy kappa ranking, but the differences between the MC scores were not as significant as those between the fuzzy kappa values (Fig. 9). This is because the degree of association of the maps we compared is moderate. In this case, significant increases in the degree of overlap entail only small increases in the MC score (see Fig. 1 in Hargrove et al., 2006). This problem was also encountered by Speich et al. (2015). There is therefore a need for a goodness-of-fit score capable of comparing maps with different numbers of classes, while detecting improvements, as well, even if the degree of spatial overlap between maps being compared is moderate.

To keep the rainfall–runoff model as simple as possible, strong assumptions had to be made. These included no interception, no evapotranspiration, and completely saturated catchments. A calibration against measured runoff would thus have been meaningless. However, recent studies suggest that using expert knowledge in selecting parameter val-

ues and introducing constraints can increase the performance of conceptual models even without traditional calibration (Bahremand, 2016; Gharari et al., 2014; Hrachowitz et al., 2014). Therefore, the choice of realistic parameter values according to Viviroli et al. (2009a) and the introduction of parameter constraints allow the simulation results obtained to be plausible. The complexity of the model structure is usually linked to the complexity of the DRP-mapping approaches. Two research directions have recently received attention, one using expert knowledge mainly in the phase of DRP identification and the other using this knowledge in the modelling phase. Hellebrand et al. (2011) used expert knowledge to determine the spatial distribution of DRPs as realistically as possible, as they assumed that with a more realistic DRP classification the modules representing each DRP in the model could be simplified. Gharari et al. (2014), in contrast, adopted a relatively complex combination of modules and fluxes to compensate for the rather simple classification they used. They, then, used expert knowledge to constrain both the model fluxes and parameters, to force the model to work well for the right reason by neglecting the actual spatial localisation of the DRPs.

In this study, the same model structure and model constraints were applied to different DRP-mapping approaches. By doing so, it was possible to investigate the effects of a specific uncertainty source (i.e. the DRP maps) on the sys-

tem output (i.e. the simulated runoff) while keeping the other uncertainty sources fixed.

As the results indicate, the simplified classification approaches mostly fail in representing the spatial localisation of the DRPs and have a large impact on the simulated runoff. This finding suggests that investing more efforts in the landscape classification could enhance runoff predictions on ungauged catchments by improving the model realism. This topic will be further investigated during future research, by addressing the uncertainties linked to different input data, model structures, model parameters, and model constraints, as well as their interaction.

6 Conclusions

Mapping DRPs manually produces robust results, but is time-consuming. Several ways of mapping DRPs automatically have been developed. They differ in terms of how much input data they require for mapping, their classification criteria, and the number of output classes.

In this study, three approaches to mapping DRPs automatically were compared in two catchments on the Swiss Plateau to determine which one produces the most realistic results. The DRP maps derived automatically with the most complex and most data-demanding approach (Schmocker-Fackel et al., 2007) were most similar to the reference maps derived according to the manual approach based on Scherrer and Naef (2003), and resulted in the lowest deviations from them when used as input data for synthetic runoff simulations. The DRP maps produced using Müller et al.'s (2009) simplified mapping approach, which requires no soil information, and those produced using Gharari et al.'s (2011) topography-based approach, differed considerably and similarly from the reference maps in terms of DRP extent and distribution. The differences arose from the inaccuracy and the coarse resolution of the input data. The simplifying assumptions these two approaches require also limit their usefulness in automatically mapping small catchments.

The runoff simulations performed with these simplified DRP maps significantly differed from those performed with the reference maps. It can be speculated that it would be worthwhile investing efforts and using expert knowledge to obtain hydrological landscape classifications that are as realistic as possible. A standardised definition of DRPs, moreover, would be helpful to avoid mapping bias due to researchers' different perceptions of DRP intensity.

7 Data availability

The SN03 maps and SF07 maps can be requested by contacting Simon Scherrer (scherrer@scherrer-hydrol.ch) and Michael Margreth (michael.margreth@soilcom.ch), respectively. MU09 maps and GH11 maps can be provided by contacting Manuel Antonetti (manuel.antonetti@wsl.ch). The GIS data used for deriving the MU09 maps and GH11 maps are covered by a license from the Federal Office of Topography swisstopo (<https://www.swisstopo.admin.ch/>). The authors can provide support for accessing them. The Mapcurves algorithm developed by Emiel van Loon (University of Amsterdam) is available online at <https://staff.fnwi.uva.nl/e.e.vanloon/paco.html>, while the PREVAH hydrological model is available at <http://www.hydrologie.unibe.ch/PREVAH>. The precipitation data can be requested from the Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss (HYPERLINK "<http://www.meteoswiss.admin.ch/>" <http://www.meteoswiss.admin.ch/>) and their use for scientific purposes is free of charge.

Appendix A

Table A1. Reclassification of the reference maps for the class comparison with the GH11 maps.

Combination	1	2	3	4	5	6
Wetland	RT1	RT1	RT1	RTs 1, 2	RTs 1, 2	RTs 1, 2, 3
Hillslope	RT2	RTs 2, 3	RTs 2, 3, 4	RT3	RTs 3, 4	RT4
Plateau	RTs 3, 4, 5	RTs 4, 5	RT5	RTs 4, 5	RT5	RT5

Table A2. Parameter values used for the 16 runs of the synthetic runoff simulations. The simulation names are of the form “*i.j*”, where *i* refers to the number of parameters defined based on the RTs and *j* refers to the different combinations.

Simulation name		0.1	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	3.1	3.2	3.3	3.4	4.1
SGRLUZ1	(mm)	30	5	30	30	30	5	5	5	30	30	30	5	5	5	30	5
SGRLUZ2	(mm)	30	15	30	30	30	15	15	15	30	30	30	15	15	15	30	15
SGRLUZ3	(mm)								30								
SGRLUZ4	(mm)	30	100	30	30	30	100	100	100	30	30	30	100	100	100	30	100
SGRLUZ5	(mm)	30	200	30	30	30	200	200	200	30	30	30	200	200	200	30	200
K0H1	(h)	20	20	5	20	20	5	20	20	5	5	20	5	5	20	5	5
K0H2	(h)	20	20	10	20	20	10	20	20	10	10	20	10	10	20	10	10
K0H3	(h)								20								
K0H4	(h)								20								
K0H5	(h)								20								
K1H1	(h)	100	100	100	10 ³	100	100	10 ³	100	10 ³	100	10 ³	10 ³	100	10 ³	10 ³	10 ³
K1H2	(h)	100	100	100	50	100	100	50	100	50	100	50	50	100	50	50	50
K1H3	(h)								100								
K1H4	(h)	100	100	100	150	100	100	150	100	150	100	150	150	100	150	150	150
K1H5	(h)	100	100	100	10 ³	100	100	10 ³	100	10 ³	100	10 ³	10 ³	100	10 ³	10 ³	10 ³
CPERC1	(mm h ⁻¹)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.04	0.12	0.12	0.04	0.12	0.04	0.04	0.12	0.04	0.04	0.04	0.04
CPERC2	(mm h ⁻¹)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.08	0.12	0.12	0.08	0.12	0.08	0.08	0.12	0.08	0.08	0.08	0.08
CPERC3	(mm h ⁻¹)								0.12								
CPERC4	(mm h ⁻¹)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.16	0.12	0.12	0.16	0.12	0.16	0.16	0.12	0.16	0.16	0.16	0.16
CPERC5	(mm h ⁻¹)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.2	0.12	0.12	0.2	0.12	0.2	0.2	0.12	0.2	0.2	0.2	0.2
CG1H	(h)								600								
SLZ1MAX	(mm)								150								
K2H	(h)								2500								

Table A3. Parameter combinations for the simulations driven by the GH11 maps. ϑ = SGRLUZ, K0H, K1H, CPERC. Subscripted numbers refer to the RTs.

Combination	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
$\vartheta_{\text{WETLAND}}$	ϑ_1	ϑ_1	ϑ_1	ϑ_1	ϑ_1	ϑ_1	ϑ_2	ϑ_2	ϑ_2	ϑ_3
$\vartheta_{\text{HILLSLOPE}}$	ϑ_2	ϑ_2	ϑ_2	ϑ_3	ϑ_3	ϑ_4	ϑ_3	ϑ_3	ϑ_4	ϑ_4
$\vartheta_{\text{PLATEAU}}$	ϑ_3	ϑ_4	ϑ_5	ϑ_4	ϑ_5	ϑ_5	ϑ_4	ϑ_5	ϑ_5	ϑ_5

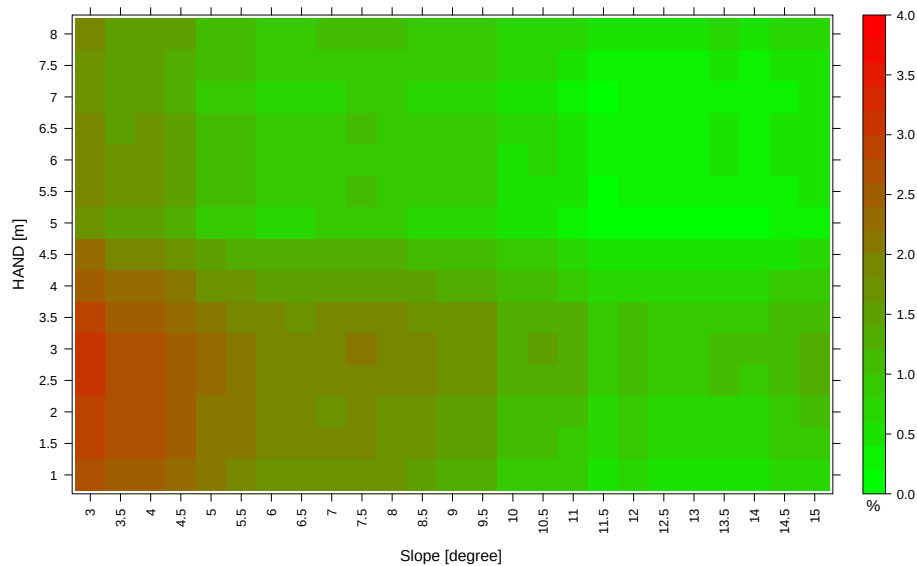


Figure A1. Sensitivity analysis of the threshold values for the HAND-based landscape classification on the whole Reppisch catchment. The level plot shows the percentage of deviation from the maximal MC score (0.2023) obtained by comparing GH11 maps with the reference maps.

Author contributions. Manuel Antonetti and Massimiliano Zappa designed the comparisons and simulations, while Rahel Buss and Manuel Antonetti performed them. Simon Scherrer produced the reference maps, Michael Margreth the SF07 maps, and Manuel Antonetti and Rahel Buss the MU09 maps and GH11 maps. Manuel Antonetti prepared the manuscript with contributions from all co-authors.

Acknowledgements. This work was funded through a PhD grant from the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN). The meteorological data used as input were provided by Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss. Peter Molnar supervised the contribution of Rahel Buss. For the calculation of Mapcurve scores, the algorithm available online developed by Emiel van Loon (University of Amsterdam) was used. We are also grateful to Daniel Farinotti and Anil Yildiz for their helpful comments and feedback, and to Silvia Dingwall for the English revision of the manuscript. We thank Shervan Gharari and another anonymous reviewer for their comments and suggestions on a previous version of the manuscript.

Edited by: M. Weiler

Reviewed by: S. Gharari and one anonymous referee

References

- Bahreman, A.: HESS Opinions: Advocating process modeling and de-emphasizing parameter estimation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 1433–1445, doi:10.5194/hess-20-1433-2016, 2016.
- Beran, M. A.: New Challenges for Regional Approach, in: Regionalization in Hydrology, Proceedings of an international symposium held at Ljubljana, April 1990, edited by: Beran, M. A., Becker, A., and Bonacci, O., IASH publication 191, Wallingford, UK, 1990.
- Beven, K. J. and Kirkby, M. J.: A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant, *Hydrol. Sci. Bull.*, 24, 43–69, doi:10.1080/02626667909491834, 1979.
- Blöschl, G.: Scaling in hydrology, *Hydrol. Process.*, 15, 709–711, doi:10.1002/hyp.432, 2001.
- Bolliger, T.: Geologie des Kantons Zürich, Stiftung Geologische Karte des Kantons Zürich, Ott Verlag, Thun, 1999.
- Boorman, D. B., Hollis, J. M., and Lilly, A.: Hydrology of soil types: a hydrologically-based classification of the soils of United Kingdom, Institute of Hydrology, Wallingford, 146, 1995.
- Cohen, J.: A Coefficient of Agreement for Nominal Scales, *Educ. Psychol. Meas.*, 20, 37–46, doi:10.1177/001316446002000104, 1960.
- Dobmann, J.: Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz. Interpretations- und Praxishilfe, Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, Saarbrücken, 2010.
- Fatichi, S., Vivoni, E. R., Ogden, F. L., Ivanov, V. Y., Mirus, B., Gochis, D., Downer, C. W., Camporese, M., Davison, J. H., Ebel, B., Jones, N., Kim, J., Mascaro, G., Niswonger, R., Restrepo, P., Rigon, R., Shen, C., Sulis, M., and Tarboton, D.: An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology, *J. Hydrol.*, 537, 45–60, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.03.026, 2016.
- Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss: Precipitation data, available at: <http://www.meteoswiss.admin.ch/>, last access: July 2016.
- Federal Office of Topography swisstopo: GIS data, available at: <https://www.swisstopo.admin.ch/>, last access: July 2016.
- Flügel, W.-A.: Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany, *Hydrol. Process.*, 9, 423–436, doi:10.1002/hyp.3360090313, 1995.
- Franks, S. W., Gineste, P., Beven, K. J., and Merot, P.: On constraining the predictions of a distributed model: The incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process, *Water Resour. Res.*, 34, 787–797, doi:10.1029/97WR03041, 1998.
- Gao, H., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Gharari, S., and Savenije, H. H. G.: Testing the realism of a topography-driven model (FLEX-Topo) in the nested catchments of the Upper Heihe, China, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 1895–1915, doi:10.5194/hess-18-1895-2014, 2014.
- Institute of Geography, University of Bern: The hydrological modelling system PREVAH, available at: <http://www.hydrologie.unibe.ch/PREVAH>, last access: July 2016.
- Gharari, S., Hrachowitz, M., Fenicia, F., and Savenije, H. H. G.: Hydrological landscape classification: investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 3275–3291, doi:10.5194/hess-15-3275-2011, 2011.
- Gharari, S., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Gao, H., and Savenije, H. H. G.: Using expert knowledge to increase realism in environmental system models can dramatically reduce the need for calibration, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4839–4859, doi:10.5194/hess-18-4839-2014, 2014.
- Hagen-Zanker, A.: An improved Fuzzy Kappa statistic that accounts for spatial autocorrelation, *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 23, 61–73, doi:10.1080/13658810802570317, 2009.
- Hantke, R. E. A.: Geologische Karte des Kantons Zürich und seine Nachbargebiete in 2 Blättern 1:50'000, Kommissionsverlag Lehmann, Zurich, 1967.
- Hargrove, W. W., Hoffman, F. M., and Hessburg, P. F.: Mapcurves: a quantitative method for comparing categorical maps, *J. Geogr. Syst.*, 8, 187–208, doi:10.1007/s10109-006-0025-x, 2006.
- Hellebrand, H., Müller, C., Matgen, P., Fenicia, F., and Savenije, H.: A process proof test for model concepts: Modelling the meso-scale, *Phys. Chem. Earth*, 36, 42–53, doi:10.1016/j.pce.2010.07.019, 2011.
- Hrachowitz, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G., McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Pomeroy, J. W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M. P., Ehret, U., Fenicia, F., Freer, J. E., Gelfan, A., Gupta, H. V., Hughes, D. A., Hut, R. W., Montanari, A., Pande, S., Tetzlaff, D., Troch, P. A., Uhlenbrook, S., Wagener, T., Winsemius, H. C., Woods, R. A., Zehe, E., and Cudennec, C.: A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)-a review, *Hydrol. Sci. J.*, 58, 1198–1255, doi:10.1080/02626667.2013.803183, 2013.
- Hrachowitz, M., Fovet, O., Ruiz, L., Euser, T., Gharari, S., Nijzink, R., Freer, J., Savenije, H. H. G., and Gascuel-Oudoux, C.: Process

- consistency in models: The importance of system signatures, expert knowledge, and process complexity, *Water Resour. Res.*, 50, 7445–7469, doi:10.1002/2014WR015484, 2014.
- Hümann, M. and Müller, C.: Improving the GIS-DRP approach by means of delineating runoff characteristics with new discharge relevant parameters, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2, 27–49, doi:10.3390/ijgi2010027, 2013.
- Jörg-Hess, S., Griessinger, N., and Zappa, M.: Probabilistic Forecasts of Snow Water Equivalent and Runoff in Mountainous Areas, *J. Hydrometeorol.*, 16, 2169–2186, doi:10.1175/JHM-D-14-0193.1, 2015.
- Kienholz, H., Keller, H., Ammann, W., Weingartner, R., Germann, P., Hegg, Ch., Mani, P., and Rickenmann, D.: Zur Sensitivität von Wildbachsystemen, Schlussbericht NFP 31, VDF Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zurich, 214 pp., 1998.
- Klemeš, V.: Dilettantism in hydrology: Transition or destiny?, *Water Resour. Res.*, 22, 177S–188S, doi:10.1029/WR022i09Sp0177S, 1986.
- Margreth, M., Naef, F., and Scherrer, S.: Weiterentwicklung der Abflussprozesskarte Zürich in den Waldgebieten, Technical Report commissioned by the Office of Waste, Water, Energy and Air (WWEA), Ct. Zurich, 2010.
- Markart, G., Kohl, B., Sotier, B., Klebinder, K., Schauer, T., Bunza, G., Pirkel, H., and Stern, R.: A Simple Code of Practice for the Assessment of Surface Runoff Coefficients for Alpine Soil-/Vegetation Units in Torrential Rain (Version 2.0), Department of Natural Hazards, Federal Research and Training Centre for Forest, Natural Hazards and Landscaper (BFW), Innsbruck, 127 pp., doi:10.13140/RG.2.1.3406.5441, 2011.
- Müller, C., Hellebrand, H., Seeger, M., and Schobel, S.: Identification and regionalization of dominant runoff processes – a GIS-based and a statistical approach, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 779–792, doi:10.5194/hess-13-779-2009, 2009.
- Mosley, M. P.: Delimitation of New Zealand hydrologic regions, *J. Hydrol.*, 49, 173–192, doi:10.1016/0022-1694(81)90211-0, 1981.
- Naef, F., Scherrer, S., Thoma, C., Weiler, W., and Fackel, P.: Die Beurteilung von Einzugsgebieten und ihren Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung – aufgezeigt an drei Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz, Untersuchung im Auftrag des Landesamts für Wasserwirtschaft, Rheinland Pfalz, Report 003, 2000.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V.: River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10, 282–290, doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6, 1970.
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., and Saleska, S.: Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model, *J. Hydrol.*, 404, 13–29, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.051, 2011.
- Pavoni N., Jäckli H., and Schindler C.: Geological Atlas of Switzerland, 1:25'000, sheet 1091, Zurich, 1992.
- Peschke, G., Etzenberg, C., Töpfer, J., Zimmermann, S., and Müller, G.: Runoff generation regionalization: analysis and a possible approach to a solution, *IAHS Publ. 254 (Regionalization in Hydrology)*, 1999.
- Peschke, G., Etzenberg, C., Töpfer, J., Zimmermann, S., and Müller, G.: Runoff generation regionalization: analysis and a possible approach to a solution, *IAHS Publ. 254 (Regionalization in Hydrology)*, 147–156, 1999.
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., and Waterloo, M. J.: HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rain-forest environments in Amazonia, *Remote Sens. Environ.*, 112, 3469–3481, doi:10.1016/j.rse.2008.03.018, 2008.
- Ross, B. B., Contractor, D. N., and Shanholtz, V. O.: A finite-element model of overland and channel flow for assessing the hydrologic impact of land-use change, *J. Hydrol.*, 41, 11–30, doi:10.1016/0022-1694(79)90101-X, 1979.
- Savenije, H. H. G.: HESS Opinions “Topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo)”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 2681–2692, doi:10.5194/hess-14-2681-2010, 2010.
- Scherrer AG: Ermittlung massgebender Hochwasserabflüsse der Reppisch, Technical Report commissioned by AWEL, Ct. Zurich 2006.
- Scherrer, S.: Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen, Report 18/2006 commissioned by LUWG, Mainz, 2006.
- Scherrer, S. and Naef, F.: A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland, *Hydrol. Process.*, 17, 391–401, doi:10.1002/hyp.1131, 2003.
- Schmocker-Fackel, P., Naef, F., and Scherrer, S.: Identifying runoff processes on the plot and catchment scale, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 891–906, doi:10.5194/hess-11-891-2007, 2007.
- Schwarze, R., Droege, W., and Opherden, K.: Regional analysis and modelling of groundwater runoff components from catchments in hard rock areas, in: *Regionalisation in Hydrology*, edited by: Diekkrüger, B., Kirkby, M. J., and Schröder, U., IAHS Publication 254. IAHS Press, Wallingford, UK, 221–232, 1999.
- Seibert, J. and McDonnell, J. J.: On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: Use of soft data for multicriteria model calibration, *Water Resour. Res.*, 38, 23–21–23–14, doi:10.1029/2001WR000978, 2002.
- Seibert, J. and McGlynn, B.: Landscape element contributions to storm runoff, in: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 1751–1761, 2006.
- Sideris, I. V., Gabella, M., Erdin, R., and Germann, U.: Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 140, 1097–1111, doi:10.1002/qj.2188, 2014.
- Speich, M. J. R., Bernhard, L., Teuling, A. J., and Zappa, M.: Application of bivariate mapping for hydrological classification and analysis of temporal change and scale effects in Switzerland, *J. Hydrol.*, 523, 804–821, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.01.086, 2015.
- Tetzlaff, D., Soulsby, C., Waldron, S., Malcolm, I. A., Bacon, P. J., Dunn, S. M., Lilly, A., and Youngson, A. F.: Conceptualization of runoff processes using a geographical information system and tracers in a nested mesoscale catchment, *Hydrol. Process.*, 21, 1289–1307, doi:10.1002/hyp.6309, 2007.
- Tilch, N., Uhlenbrook, S., and Leibundgut, C.: Regionalisierungsverfahren zur Ausweisung von Hydrotopen in von periglazialen Hangschutt geprägten Gebieten, *Grundwasser*, 7, 206–216, doi:10.1007/s007670200032, 2002.
- van Loon, E.: Mapcurves algorithm, available at: <https://staff.fnwi.uva.nl/e.e.vanloon/paco.html>, last access: July 2016.
- Visser, H. and de Nijs, T.: The Map Comparison Kit, *Environ. Modell. Softw.*, 21, 346–358, doi:10.1016/j.envsoft.2004.11.013, 2006.

- Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J., and Weingartner, R.: Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results, *J. Hydrol.*, 377, 208–225, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.022, 2009a.
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., and Weingartner, R.: An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools, *Environ. Model. Softw.*, 24, 1209–1222, doi:10.1016/j.envsoft.2009.04.001, 2009b.
- Waldenmeyer, G.: Abflussbildung und Regionalisierung in einem forstlich genutzten Einzugsgebiet (Dürreychtal, Nordschwarzwald), *Karlsruher Schriften zur Geographie und Geoökologie*, IFGG, Karlsruhe, 2003.
- Weiler, M. and McDonnell, J.: Virtual experiments: a new approach for improving process conceptualization in hillslope hydrology, *J. Hydrol.*, 285, 3–18, doi:10.1016/S0022-1694(03)00271-3, 2004.
- Woods, R. A., Sivapalan, M., and Robinson, J. S.: Modeling the spatial variability of subsurface runoff using a topographic index, *Water Resour. Res.*, 33, 1061–1073, doi:10.1029/97WR00232, 1997.

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

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

Zusammenfassung

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

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

1. Einführung

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

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

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

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

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

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

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

2. Das prozessnahe Abflussbildungsmodul

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

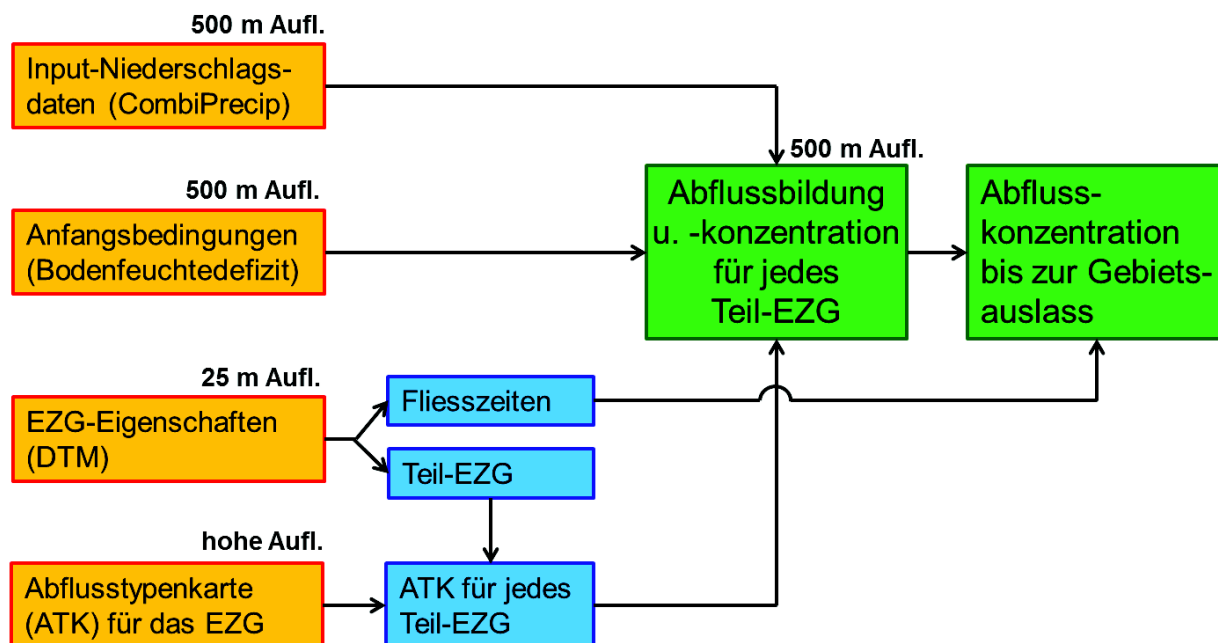


Abb. 1: Das Flussdiagramm stellt die verfolgte Strategie zur Integration von Prozessinformation im hydrologischen Modell dar.

Aus einem Höhenmodell (DTM) wird das gesamte Untersuchungsgebiet in verschiedene, bis zu 0.5 km² grosse **Teil-EZG** unterteilt. Für jeden Auslass der berechneten Teil-EZG wird eine charakteristische **Fliesszeit** in den Gerinnen bis zum Gebietsauslass mit dem TANA-LYS-Tool (SCHULLA 1997) berechnet. Die **Abflussbildung** und die **Abflusskonzentration** auf der Landoberfläche bis zum Teilgebietsauslass werden somit gekoppelt berechnet. Das Routing im Gerinne bis zum Gebietsauslass erfolgt danach separat anhand eines Linear-speicher-Ansatzes.

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

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

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

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

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

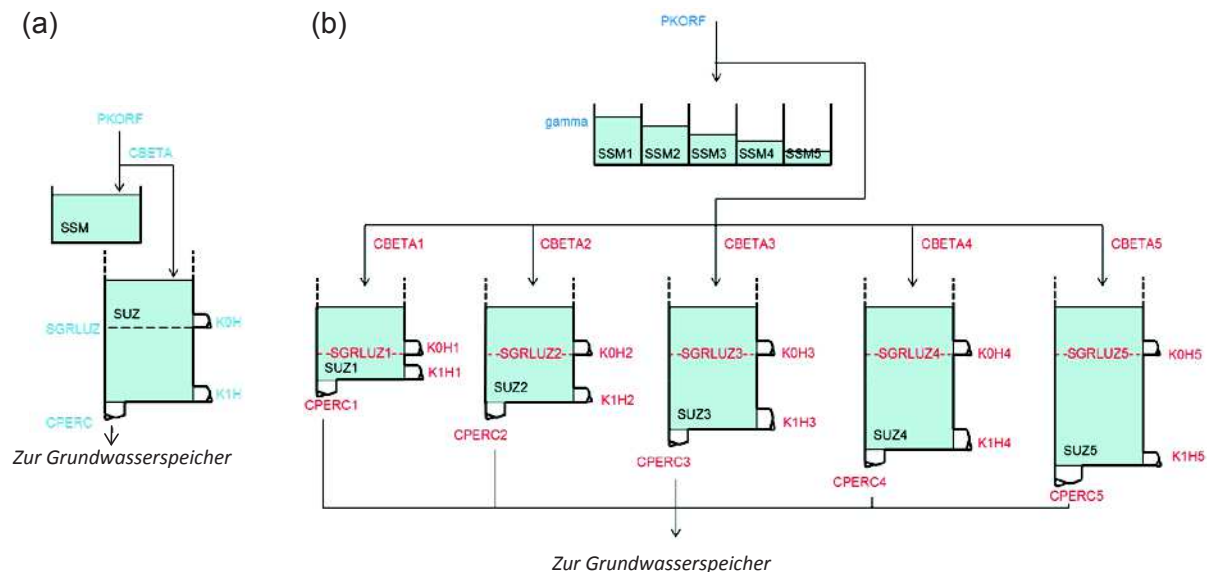


Abb. 2: (a) Das traditionelle Abflussbildungsmodul von PREVAH. Verändert nach VIVIROLI et al., (2009a); (b) Das prozessbasierte Abflussbildungsmodul. Rote bzw. blaue Beschriftungen beziehen sich auf abflusstyp- bzw. zellenbezogene Parameter.

Der Ausgang des Bodenfeuchtespeichers SSM führt in den Abflussspeicher SUZ. Von diesem gehen zwei Ausgänge raus, einerseits der schnelle Oberflächenabfluss und andererseits der verzögerte Zwischenabfluss im Boden. Diese zwei Auslässe werden durch zwei Speicherkonstanten K0H bzw. K1H gesteuert, während ein Speichergrenzwert SGRLUZ zur Aktivierung des oberirdischen Abflusses dient. Zudem führt eine Versickerungskomponente mit einer maximalen Intensität CPERC in die unteren Grundwasserspeicher, welche verschiedene Grundwasserkomponenten bezeichnen. Abflussbildung, Abflusskonzentration und Routing werden gekoppelt berechnet. Dies verunmöglicht zuverlässige Simulationen mit dem traditionellen PREVAH in ungemessene Gebiete, da die Speicherkonstanten stark von EZG-Eigenschaften wie z.B. Gebietsgrösse oder Gerinnetichte abhängen.

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

3. Modellparametrisierung

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

so festgelegt werden, dass sie eine möglichst hohe Allgemeingültigkeit haben und somit auf möglichst viele Landschaften, Böden und Gesteinsformationen unverändert übertragen werden können. Die Innovation des prozessnahen Abflussbildungsmodul liegt deshalb in der „a priori“ Festlegung von Parameterintervallen: Wertebereiche für den Infiltrationsparameter CBETA sowie für den Speichergrenzwert des oberirdischen Abflusses SGRLUZ können in Abhängigkeit von Prozesstyp bzw. -intensität „a priori“ bestimmt werden. Dies gilt auch für die Speicherkonstanten des oberirdischen Abflusses K0H und des unterirdischen Abflusses K1H sowie für die maximale Perkolationsintensität CPERC. Die Parameterbereiche werden so bestimmt, dass die Abflussreaktion der HOF-, SOF-, SSF- und DP-Flächen möglichst genau und allgemein gültig berechnet werden kann. Zu diesem Zweck wurden ausgewählte Berechnungsversuche nachgerechnet, die zur Untersuchung der Abflussprozesse auf kleinen homogenen, ca. 60 – 120 m² grossen Flächen mit klar definierten künstlichen Niederschlägen unterschiedlicher Intensität von SCHERRER (1997) und KIENZLER (2007) durchgeführt wurden (Tabelle 3).

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

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

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

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

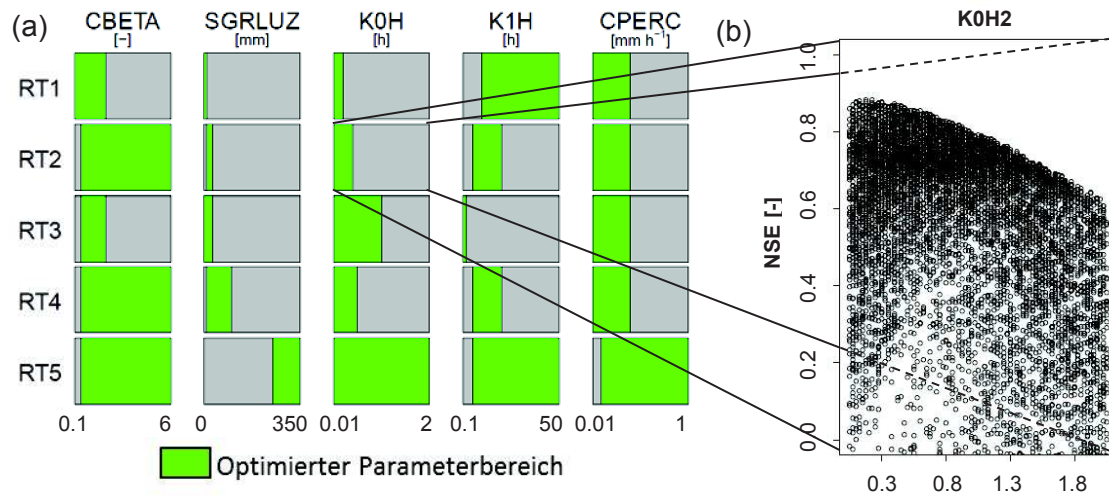


Abb. 3: (a) Parameterbereiche für jeden Abflusstyp (RT1-5), optimiert anhand der Nachrechnung von Beregnungsversuchen. (b) Beispiel der Optimierung des Parameterbereichs K0H für den Abflusstyp 2. NSE = „Nash-Sutcliffe Efficiency“

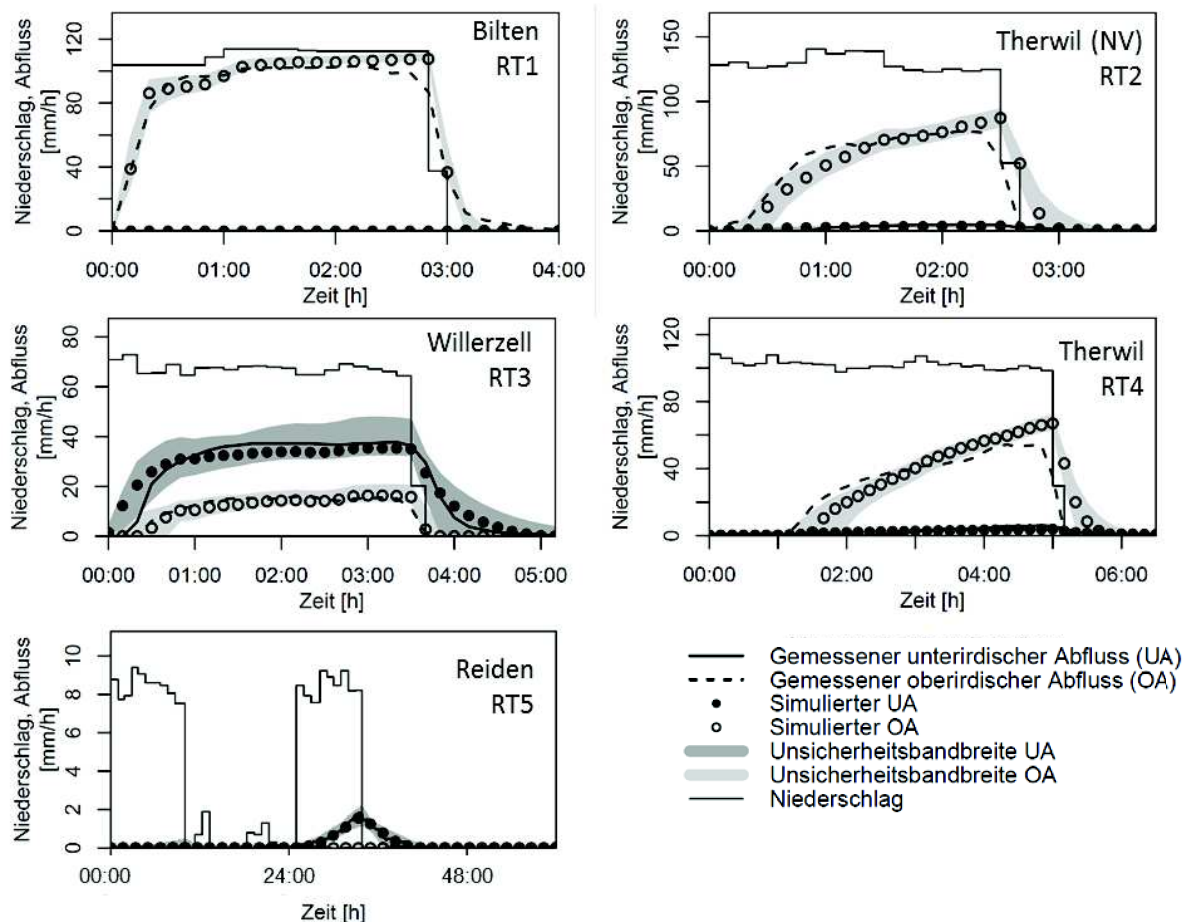


Abb. 4: Gemessene und nachgerechnete Abflussganglinien der Beregnungsversuche aus Tabelle 3. Unsicherheitsbandbreiten umfassen simulierten Abfluss der besten 100 Läufe.

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

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

4 Übertragbarkeit auf klein- und mesoskalige Einzugsgebiete

4.1 Die Untersuchungsgebiete

Für diese Studie wurden zwei kleinskalige EZG in den Schweizer Voralpen sowie zwei mesoskalige EZG im Schweizer Mittelland ausgewählt (Abbildung 5). Der Sperbelgraben und der Rappengraben liegen wenige Kilometer voneinander entfernt im steilen Emmental. Diese kleinen EZG (ca. 0.5 km²) liegen in der Napf-Nagelfluh, die eine mittlere bis geringe Durchlässigkeit aufweist (BAFU 2015). In beiden Gebieten dominieren Braunerden mit mässigem Wasserspeichervermögen und normaler Durchlässigkeit. Nur die Landnutzung unterscheidet sich markant mit praktisch vollständiger Bewaldung im Sperbelgraben und nur etwa 50%iger Waldbedeckung im Rappengraben. In beiden Gebieten herrschen leicht verzögert bis verzögert reagierende Flächen (AT2 und AT3, ca. 95%) vor (Abbildung 6). Die Abflussreaktion ist daher ziemlich rasch und stark.

Das EZG der Reppisch bis Birmensdorf umfasst eine Fläche von 22 km². Davon sind 12 % Siedlungs-, 48 % Gras- und 38 % Waldflächen. Die Reppisch hat sich tief in das von Gletschern geprägte Tal eingeschnitten und teilweise steile, heute meist bewaldete Flanken geschaffen. Der Unterbau des EZG bildet die aus Sandsteinen und Mergeln aufgebaute Obere Süsswassermolasse (HANTKE et al., 1967). Im Grossteil des EZG liegen ausgedehnte Flächen mit normal durchlässigen und speicherfähigen Braunerdeböden. Von Stau-, Hang- oder von Grundwasser geprägte Böden mit mässiger Durchlässigkeit und mässigem Speichervermögen sind im Gebiet weniger stark verbreitet. Insgesamt überwiegen im EZG der Reppisch verzögert bis stark verzögert reagierende Flächen (AT3 und AT4, 71.4%; Abbildung 6). Die Abflussreaktion kann daher als mässig bis stark bezeichnet werden.

Der Dorfbach entwässert in Meilen ein EZG von 4.6 km² und mündet direkt in den Zürichsee (Abb. 5 rechts). Das EZG des Dorfbachs Meilen ist von der Oberen Süsswassermolasse geprägt (HANTKE ET AL., 1967; ZINGG, 1934). Es ist vor allem die Nagelfluh, welche den oberflächennahen Untergrund dominiert. Lokal tritt Würmmoräne auf. Insgesamt liegen im EZG ausgedehnte Gebiete mit normal durchlässigen und speicherfähigen Braunerdeböden. Der Anteil an vernässten Böden mit mässiger Durchlässigkeit und eher geringem Speichervermögen ist höher als in der Reppisch. Im EZG des Dorfbachs machen die Abflusstypen 1-3 (rasch, leicht verzögert und verzögert beitragende Flächen) einen Anteil von insgesamt 41.5% der EZG-Fläche aus, 58.5% der Fläche reagieren stark bis sehr stark verzögert auf Niederschläge (AT4 und AT5; Abbildung 6). Aufgrund dieser Flächenverteilung zeigt der Dorfbach eine mässige bis starke Reaktion auf Niederschläge.

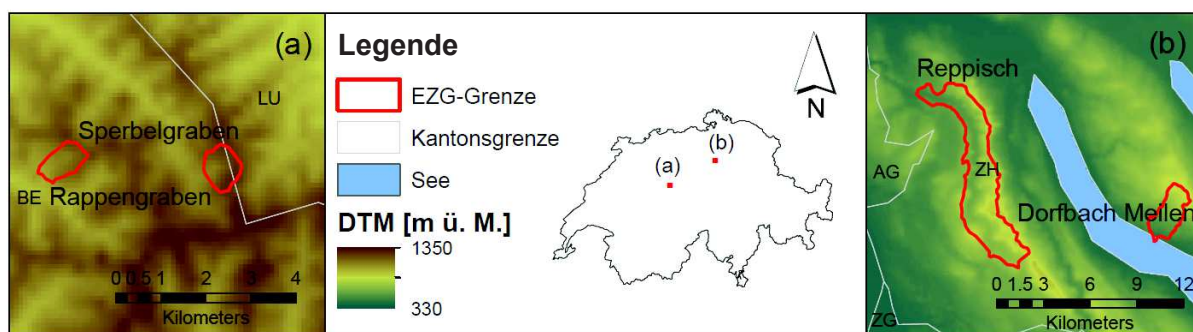


Abb. 5: Übersicht über die Untersuchungsgebiete.

Quelle: BFS GEOSTAT/Bundesamt für Landestopografie swisstopo.

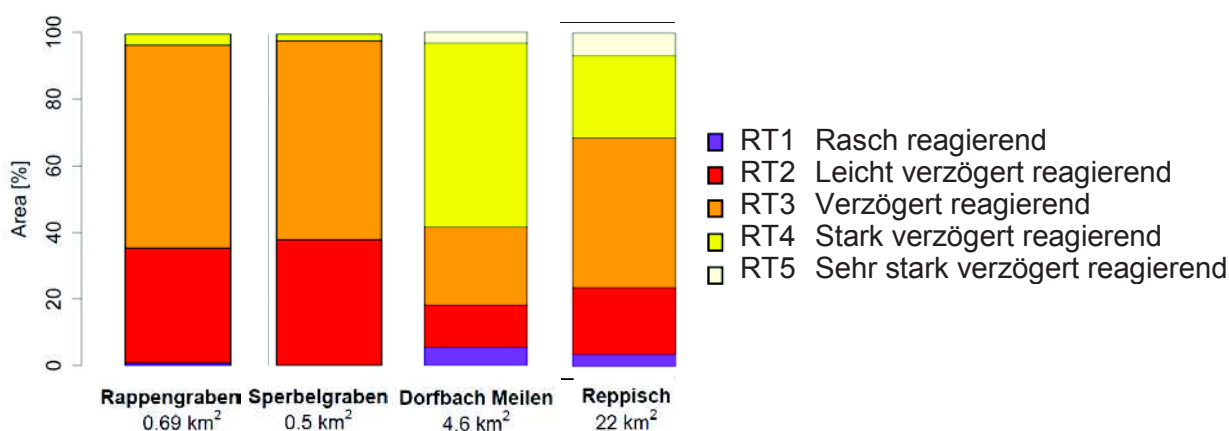


Abb. 6: Ausdehnung der Abflusstypenflächen in den vier Untersuchungsgebieten.

4.2 Vergleich zwischen prozessnahe und traditionellem PREVAH

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

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

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

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

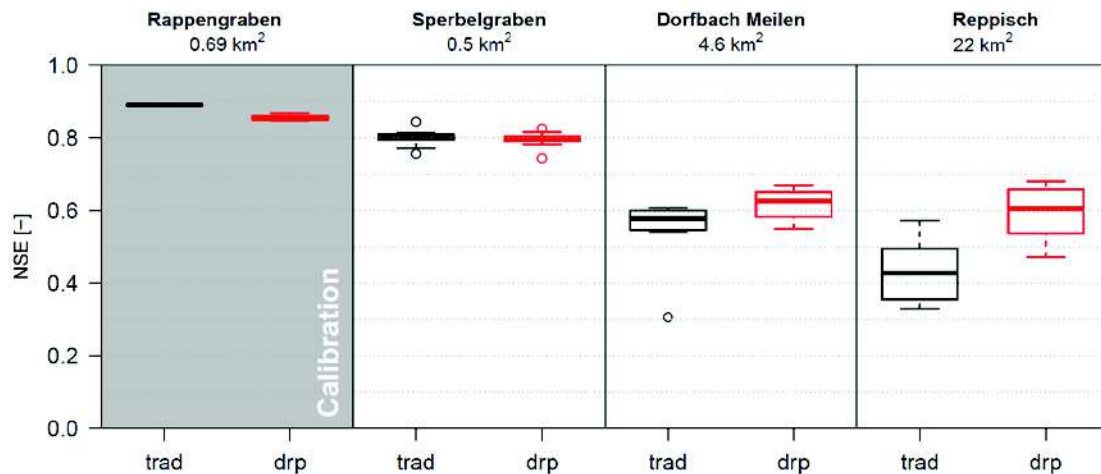


Abb. 7: Leistungsvergleich zwischen dem traditionellen PREVAH („trad“) und dem prozessnahen Abflussbildungsmodul („drp“) im Kalibrierungsgebiet (grauer Hintergrund) und auf die Verifikationsgebiete (weisser Hintergrund). Die Boxplots zeigen die Spannweite der Ergebnisse, die sich aufgrund der 10 besten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

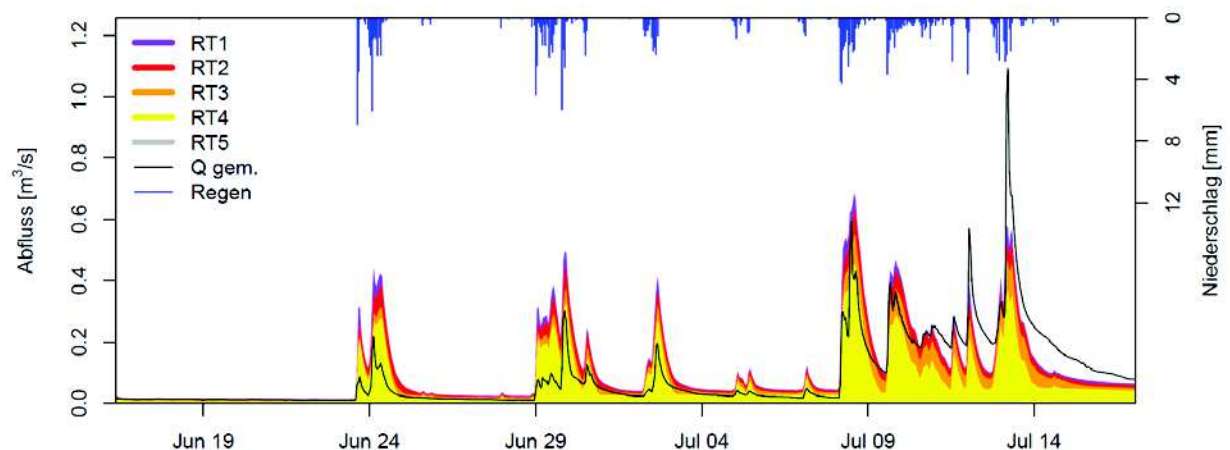


Abb. 8: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Abflussganglinie mit dem Beitrag der verschiedenen Abflusstypenflächen für den Dorfbach Meilen. Für die Simulation wurde die beste Parameterkombination aus der Kalibrierung im Rappengraben verwendet.

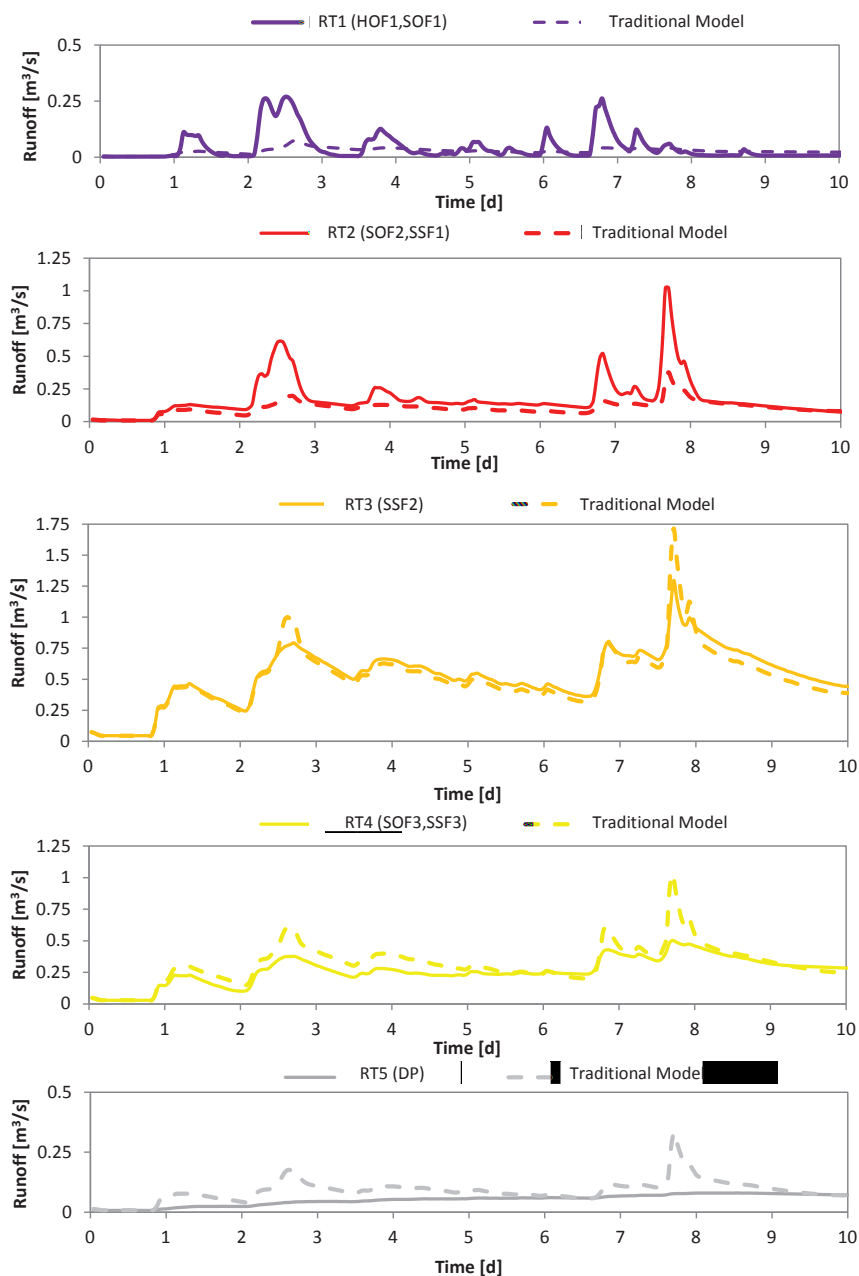


Abb. 9: Vergleich zwischen Abflussganglinien der unterschiedlichen Abflusstypen aus der Reppisch. Durchgehende Ganglinien zeigen den mit dem prozessnahen Abflussbildungsmodul berechneten Abfluss. Gestrichelte Linien zeigen die mit dem traditionellen PREVAH simulierte Ganglinie. Verändert nach BUSS (2014).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Modelle in den zwei kleinen EZG sowohl in der Kalibrierungsphase als auch in der Validierungsphase eine ähnliche Güte aufweisen. Die Simulationen in den beiden grösseren EZG konnten nur mit einer weniger guten Performance durchgeführt werden (Abbildung 7). Mögliche Gründe dafür lassen sich anhand von Abbildung 8 erahnen. Eine bedeutende Rolle in den Berechnungen nehmen sicherlich die Speicherkonstanten K_{0H} und K_{1H} ein. Sie wurden im meist sehr steilen Gebiet des Rappengraben kalibriert und dann auf die flacheren mittelländischen EZG der Reppisch und des Dorfbaches Meilen übertragen. Die zu rasche Reaktion im Dorfbach Meilen lässt sich teilweise auf die

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

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

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

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

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

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

Danksagung

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

Literatur

- BAFU (2015): Abgerufen unter <http://www.hydrodaten.admin.ch/de/2282.html> und <http://www.hydrodaten.admin.ch/de/2283.html> am 19.10.2015.
- BUSS, R. (2014): Evaluating different dominant runoff processes mapping approaches with similarity measures and synthetic runoff simulations. Masterarbeit am Institut für Umwelt-ingenieurwissenschaften. ETH Zürich. 129 S.
- HANTKE, R. (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete. - Vierteljahresschr. Natforsch. Ges. Zürich, 112/2, S. 91 - 112.
- KIENZLER, P. (2007): Experimental study of subsurface stormflow formation. Diss ETH Zürich Nr. 17330, 94 S.
- MÜLLER, C., HELLEBRAND, H., SEEGER, M., AND SCHOBEL, S. (2009): Identification and regionalization of dominant runoff processes – a GIS-based and a statistical approach, Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, S. 779-792.
- NAEF, F., SCHERRER, S., THOMA, C., WEILER, W., & FACKEL, P. (2000): Die Beurteilung von Einzugsgebieten und ihren Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung - aufgezeigt an drei Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz. Untersuchung im Auftrag des Landesamts für Wasserwirtschaft, Rheinland Pfalz. IHW Bericht B 003.
- SCHERRER AG (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Landesamt für Umwelt, Wasserwirts. und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz.
- SCHERRER, S. (1997): Abflussbildung bei Starkniederschlägen. Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Nr. 147.
- SCHERRER, S. & NAEF, F. (2003): A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland, Hydrological Processes, 17, S. 391-401.
- SCHMOCKER-FACKEL, P., NAEF, F., AND SCHERRER, S. (2007): Identifying runoff processes on the plot and catchment scale, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, S. 891-906.
- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Diss. 12018, ETH Zürich, 163 S.
- SIDERIS, I. V., GABELLA, M., ERDIN, R., & GERMANN, U. (2014): Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 140, S. 1097-1111.
- VIVIROLI, D., ZAPPA, M., GURTZ, J., & WEINGARTNER, R. (2009a): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools, Environ. Model. Softw., 24, S. 1209-1222.
- VIVIROLI, D., MITTELBACH, H., GURTZ, J., & WEINGARTNER, R. (2009b): Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results, Journal of Hydrology, 377, S. 208-225.
- ZINGG, T. (1934): Erläuterungen zu Atlasblatt 7 (226 Monchaltorf, 227 Hinwil, 228 Wädenswil, 229 Rapperswil). D. geol. Atlas der Schweiz.

RESEARCH ARTICLE

Process-based hydrological modelling: The potential of a bottom-up approach for runoff predictions in ungauged catchments

Manuel Antonetti^{1,2}  | Simon Scherrer³ | Peter Matthias Kienzler³ | Michael Margreth⁴ | Massimiliano Zappa¹

¹Swiss Federal Research Institute WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, Switzerland

²Department of Geography, University of Zurich, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zurich, Switzerland

³Scherrer AG, Schönmattstrasse 8, 4153 Reinach, Switzerland

⁴SoilCom GmbH, Probusweg 22, 8057 Zurich, Switzerland

Correspondence

Manuel Antonetti, Swiss Federal Research Institute WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, Switzerland.
Email: manuel.antonetti@wsl.ch

Funding information

Swiss Federal Office for the Environment (FOEN)

Abstract

Conceptual rainfall–runoff models are a valuable tool for predictions in ungauged catchments. However, most of them rely on calibration to determine parameter values. Improving the representation of runoff processes in models is an attractive alternative to calibration. Such an approach requires a straightforward, a priori parameter allocation procedure applicable on a wide range of spatial scales. However, such a procedure has not been developed yet.

In this paper, we introduce a process-based runoff generation module (RGM-PRO) as a spin-off of the traditional runoff generation module of the PREVAH hydrological modelling system. RGM-PRO is able to exploit information from maps of runoff types, which are developed on the basis of field investigations and expert knowledge. It is grid based, and within each grid cell, the process heterogeneity is considered to avoid information loss due to grid resolution. The new module is event based, and initial conditions are assimilated and downscaled from continuous simulations of PREVAH, which are also available for real-time applications. Four parameter allocation strategies were developed, on the basis of the results of sprinkling experiments on 60-m² hillslope plots at several grassland locations in Switzerland, and were tested on five catchments on the Swiss Plateau and Prealps. For the same catchments, simulation results obtained with the best parameter allocation strategy were compared with those obtained with different configurations of the traditional runoff generation module of PREVAH, which was also applied as an event-based module here. These configurations include a version that avoids calibration, one that transfers calibrated parameters, and one that uses regionalised parameter values.

RGM-PRO simulated heavy events in a more realistic way than the uncalibrated traditional runoff generation module of PREVAH, and, in some instances, it even exceeded the performance of the calibrated traditional one. The use of information on the spatial distribution of runoff types additionally proved to be valuable as a regionalisation technique and showed advantages over the other regionalisation approaches, also in terms of robustness and transferability.

KEYWORDS

dominant runoff process, hydrological modelling, regionalisation, sprinkling experiments, Switzerland

1 | INTRODUCTION

Predicting runoff in ungauged catchments is among the most important tasks of hydrologists, given that runoff data are only available for a small percentage of the catchments throughout the world. The techniques developed for this purpose can basically be grouped into

statistical and process-accounting methods (Blöschl, Sivapalan, Wagener, Viglione, & Savenije, 2013). Statistical methods establish empirical relationships between catchment characteristics and runoff and can be based on indexes, regression models, or geostatistics (for a review, we refer to Blöschl et al., 2013, and Hrachowitz et al., 2013). Rainfall–runoff models, an example of process-accounting

methods, are based on the hydrologist's understanding of the catchment and rely on the assumption that by simulating the runoff processes in a realistic manner, good extrapolation over space and time can be achieved. Physically based rainfall-runoff models attempt to solve continuity equations (e.g., the Richards equations) by using measurable parameters, which cannot be measured everywhere. In addition, such models are usually computationally expensive and rely on assumptions derived at small scales, which do not necessarily work on the catchment scale (Beven, 2001; Grayson, Moore, & McMahon, 1992). In contrast, conceptual models are computationally more efficient but rely on simplified representations of the catchment components and are controlled by parameters, which are not always directly measurable or inferable from the field (McDonnell et al., 2007). Conceptual models therefore need to be calibrated against measured runoff data. In recent decades, a plethora of calibration and optimisation techniques has been developed to optimise the model response by forcing the model parameters to compensate for uncertainties and lack of knowledge (e.g., Beven & Binley, 1992; Gupta, Sorooshian, & Yapo, 1998; Moradkhani, Sorooshian, Gupta, & Houser, 2005). Given their nature, these uncertainties can change in time and space; this is why, as recently stated by Bahremand (2016), the focus of research should be more on the representation of processes in the model than on parameter optimisation techniques (see also Semenova & Beven, 2015; Vinogradov, Semenova, & Vinogradova, 2011).

A process-based modelling strategy compatible with conceptual models can be based on the concept of dominant runoff process (DRP; Blöschl, 2001). This concept is built on the hypothesis that, among the different runoff generation mechanisms that may occur at a given location (Hortonian overland flow [HOF], saturation overland flow [SOF], subsurface flow [SSF], and deep percolation [DP]), there will be one that contributes most to runoff and is therefore the DRP.

Several studies have developed methods for identifying DRPs and models focussed on them. Basically, two strategies can be recognised: the top-down and bottom-up approaches. The first strategy follows the coevolutionary concept expressed by Savenije (2010) and is mainly based on the "height above the nearest drainage" metric (Gharari, Hrachowitz, Fenicia, & Savenije, 2011; Rennó et al., 2008). Examples of top-down modelling approaches based on the DRP concept are given in Gao, Hrachowitz, Fenicia, Gharari, and Savenije (2014), Gharari, Hrachowitz, Fenicia, Gao, and Savenije (2014), Euser, Hrachowitz, Winsemius, and Savenije (2015), Fenicia, Kavetski, Savenije, and Pfister (2016), and Nijzink et al. (2016) and were not investigated further in this study. In the bottom-up approach, the system is first studied at the small scale, typically with field investigations and/or sprinkling experiments. The resulting knowledge is then extrapolated to larger scales (Schmocker-Fackel, Naef, & Scherrer, 2007).

An overview of the bottom-up approaches based on the DRP concept is given in Table 1. With regard to the hydrological classification, these approaches are usually based on that of Scherrer and Naef (2003), who developed a classification and decision scheme on the basis of the results of sprinkling experiments and field investigations (Scherrer, Naef, Faeh, & Cordery, 2007). Notable exceptions are the hydrological classifications developed on the basis of hillslope genesis (Tilch, Uhlenbrook, & Leibundgut, 2002) or vegetation types (Markart

et al., 2004). In some cases, the runoff generation modules of already existing hydrological modelling systems are adapted (e.g., Casper, Gronz, & Gemmar, 2015; Gronz, 2013; Haag, Luce, Henn, & Demuth, 2016), whereas in most cases, new runoff generation modules are built for exploiting information on DRPs (e.g., Hellebrand, Müller, Matgen, Fenicia, & Savenije, 2011; Johst et al., 2008; Schmocker-Fackel, 2004; Smoorenburg, 2015; Uhlenbrook, Roser, & Tilch, 2004; VAW, 1994). The spatial distribution of DRPs is considered by defining either a grid-based or a hydrological response unit-based spatial discretisation. Concerning the model structure, it is possible to discern between two distinct approaches. In an "one-size-fits-all" approach, the structure of the runoff generation module is fixed, and only the parameter set changes for each DRP (e.g., Carver et al., 2009; Haag et al., 2016; Hellebrand & van den Bos, 2008). In contrast, within a flexible framework, both structure and parameter set are developed specifically for each DRP (Hellebrand et al., 2011; Uhlenbrook et al., 2004). According to their scope, DRP-based runoff generation modules and models are designed as either continuous or event based, depending on whether the evapotranspiration process is simulated rather than estimated from outside information or fixed at a certain rate.

However, nearly all of the models mentioned above rely on calibration for the estimation of parameter values and are therefore not directly applicable to ungauged catchments, unless an approach for transferring the parameter values is available (Casper et al., 2015; Dunn, Soulsby, & Lilly, 2003; Haag et al., 2016; Hellebrand et al., 2011; Rosin, 2010; Uhlenbrook et al., 2004). Notable exceptions are represented by Blöschl, Reszler, and Komma (2008), Steinbrich, Leistert, and Weiler (2016), and VAW (1994), who performed a logic-based specification of parameter values, from here on referred to as "parameter allocation" (Bahremand, 2016). Blöschl et al. (2008) developed a distributed model for forecasting flash floods in northern Austria. However, their parameter allocation strategy is based on field investigations, runoff data, and piezometric heads of the catchment where the model is applied. The application of their model to a new catchment would therefore require a significant effort to redefine the values of the model parameters. Recently, Steinbrich et al. (2016) developed the RoGeR model for predicting flash floods in the state of Baden-Württemberg. The model avoids the use of calibration, but, for the parameter allocation, high-resolution data are needed (e.g., soil maps and hydrogeological maps). Furthermore, the particularly high spatial and temporal resolution of the model reduces its applicability to large mesoscale catchments. QAREA is an event-based rainfall-runoff model developed in Switzerland (VAW, 1994). It is based on response curves, obtained from idealised results of sprinkling experiments, for the partitioning of rainfall into fast and slow runoff components (for more details, we refer to Smoorenburg, 2015). Its parameterisation makes QAREA particularly suitable for transferability to other catchments, provided that the spatial distribution of DRPs is known. However, the requirement to define the initial conditions in QAREA is problematic, and the model is not able to directly exploit spatially distributed information on soil moisture.

A DRP-based modelling framework able to achieve both a high computational efficiency and a wide applicability over different spatial scales is still lacking. Therefore, the objectives of this paper are to (a) introduce a new process-based runoff generation module (RGM-

TABLE 1 Overview of integration approaches of spatially distributed information on DRP in rainfall–runoff models

Model	Author(s)	DRP mapping approach	TS	Spatial discretisation	Model structure	Parameter determination
LARSIM	Haag et al. (2016)	Scherrer and Naef (2003)	CO	Grid based	One parameter set for each HRU	Calibration
LARSIM	Casper et al. (2015); Gronz (2013)	Steinrücken and Behrens (2010)	CO	HRU based	One parameter set for each HRU	Calibration
QAREA	VAW (1994); Horat (2000)	Scherrer and Naef (2003)	EB	HRU based	One response curve for each HRU	A priori definition
QAREA-pro	Schmocker-Fackel (2004)	Based on Scherrer and Naef (2003)	EB	HRU based	One module for each HRU	A priori definition
QAREA ⁺	Smootenburg (2015)	Based on Scherrer and Naef (2003)	EB	HRU based	One model configuration for each HRU	A priori definition
DIY model	Dunn et al. (2003)	Boorman, Hollis, and Lilly (1995)	CO	HRU based	One parameter set for each HRU	Calibration
–	Hellebrand and van den Bos (2008)	Steinrücken, Behrens, and Scholten (2006)	CO	HRU based	One parameter set for each HRU	Calibration
DRP model	Hellebrand et al. (2011)	Müller, Hellebrand, Seeger, and Schobel (2009)	CO	HRU based	One RGM for each HRU	Calibration
TAC ^D	Uhlenbrook et al. (2004)	Tilch et al. (2002)	CO	Grid based	Sequentially connected RGMs	Manual calibration
Runoff coefficient model	Carver et al. (2009)	Carver et al. (2009)	CO	Grid based with subgrid parameterisation of DRPs	One runoff coefficient for each HRU	A priori definition
Process model	Rosin (2010)	Rosin (2010)	EB	Grid based	One specific combination of RGMs for each HRU	Calibration
KAMPUS (aka flash flood model)	Reszler et al. (2006); Blöschl et al. (2008); Rogger et al. (2012)	Markart et al. (2004)	CO	Grid based	One parameter set for each HRU	A priori definition (Reszler et al., 2006; Blöschl et al., 2008) Manual calibration (Rogger et al., 2012)
ZEMOKOST	Kohl and Stepanek (2005)	Markart et al. (2004)	EB	HRU based	One runoff coefficient for each HRU, calculation of flow times	A priori definition
RoGeR	Steinbrich et al. (2016)	Steinbrich et al. (2016)	EB	Grid based	One parameter set for each DRP	A priori definition

Note. CO = continuous; DRP = dominant runoff process; EB = event based; HRU = hydrological response unit; RGM = runoff generation module; TS = temporal scale.

PRO) able to use information on the spatial distribution of DRPs, (b) evaluate different strategies for its a priori parameter allocation, and (c) compare its performance with that of a traditional conceptual runoff generation module (RGM-TRD) when applied to ungauged catchments.

In this paper, we present a process-based spin-off of the runoff generation module of the PREVAH hydrological modelling system (Gurtz et al., 2003; Viviroli, Zappa, Gurtz, & Weingartner, 2009; Zappa & Gurtz, 2003). Four parameter allocation strategies developed on the basis of the results of sprinkling experiments are evaluated, and the best one is used to compare the results of RGM-PRO with those of different configurations of RGM-TRD on several catchments.

2 | DATA AND METHODS

2.1 | Sprinkling experiments and study catchments

The use of sprinkling experiments is fundamental for gaining knowledge about the processes occurring at the plot scale (Scherrer & Naef,

2003) and for trying to upscale this knowledge with a rainfall runoff model (e.g., Dobmann, 2010; Kohl, Klebinder, Sotier, Markart, & Meissl, 2016; Schindewolf & Schmidt, 2009). For this paper, the results of 12 sprinkling experiments performed in eight sites in Switzerland by Scherrer (1997) and Kienzler (2007) were available (Table 2, Figure 1). Precipitation at rates of 20–100 mm/h was applied on 60-m² hillslope plots for durations between three and six h. The generated overland flow, near surface flow, and subsurface flow were gauged. Also, soil moisture, soil water suction, and soil water table were measured. Sites were selected to cover a broad range of conditions with respect to geology, soil characteristics, and topography. Each individual site was selected as homogeneous as possible within the plot to facilitate the determination of the DRP. For more details on the sprinkling experiments, we refer to Scherrer et al. (2007) and Kienzler and Naef (2008). Selected sprinkling experiments were simulated by Faeh, Scherrer, and Naef (1997), who numerically solved the two-dimensional Richard's equations with the physically based model QSOIL. Recently, Steinbrich et al. (2016) simulated a subset of the same sprinkling experiments with the a priori parameterised RoGeR model. Their results were used as basis for comparison within the present study.

TABLE 2 Details of the sites where data from sprinkling experiments are available

No.	Location	LS	Soil classification	Parent material	VC	Slope (%)	DRP according to Scherrer and Naef (2003)
1	Willerzell (sink)	PA	Humic gleysol	Sandstone-colluvium	p	36	SOF1
2	Bilten	PA	Humic gleysol	Conglomerate	f	31	SOF1
3/1	Heitersberg	SP	Eutric cambisol	Moraine	m	27	HOF1
3/2	Heitersberg	SP	Eutric cambisol	Moraine	m	27	HOF1
4	Therwil	URP	Luvisol	Sandstone-shale	m	23	SOF2
5/1	Willerzell (hillslope)	PA	Ranker	Sandstone	p	55	SSF2
5/2	Willerzell (hillslope)	PA	Ranker	Sandstone	p	55	SSF2
6	Lutertal	SP	Cambisol	Siltstone of "Oeningien" Molasse	m	30	SSF2
7	Schlüssberg	PA	Calcaric cambisol	Ground moraine	m	28	SSF3
8/1	Therwil	URP	Luvisol	Sandstone-shale	m	23	SOF3
8/2	Therwil	URP	Luvisol	Sandstone-shale	m	23	SOF3
9	Reiden	SP	Cambisol	Sandstone of "Helvetien" Molasse	m	40	SSF3-DP

Note. Adapted from Scherrer et al. (2007) and Kienzler and Naef (2008).

DRP = dominant runoff process; f = forest; LS = landscape; m = meadow; p = pasture; PA = Prealps; SP = Swiss Plateau; URP = Upper Rhine Plain; VC = vegetation cover.

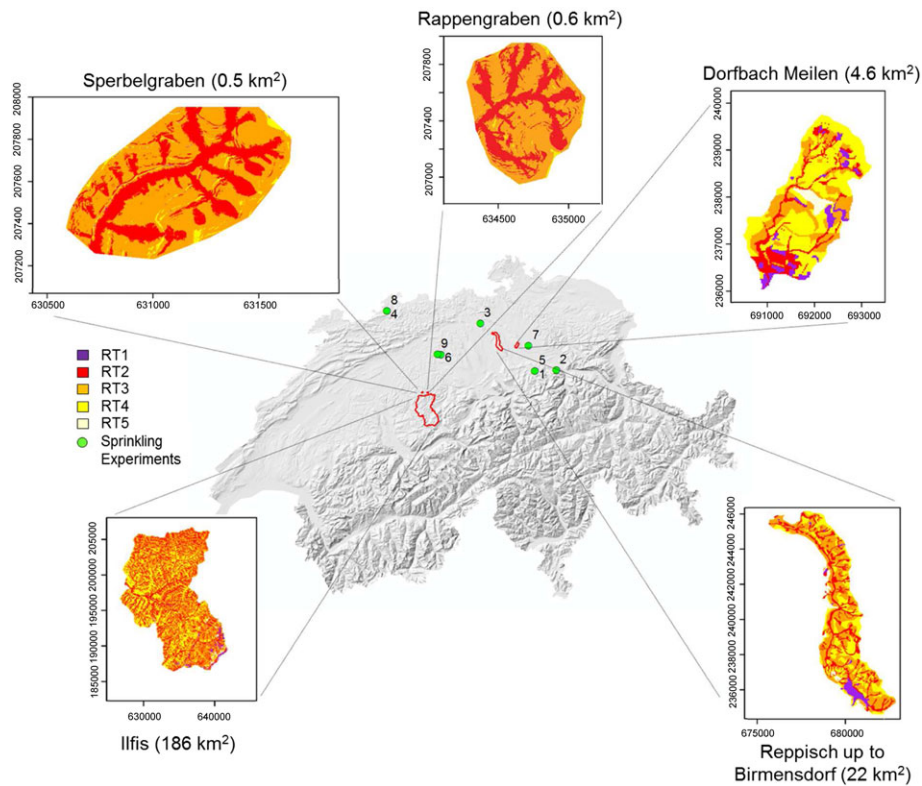


FIGURE 1 Overview of the location of the sprinkling experiments, the five study catchments, and their maps of runoff types (data: Federal Office of Topography swisstopo). RT, runoff type

For this study, runoff simulations were performed for several catchments located in Switzerland (Figure 1). The Sperbelgraben and the Rappengraben are located close to each other in the Emmental region, Canton Bern. They are similar in terms of area (about 0.5 km²), geology (Molasse with conglomerate layers), soil type (mainly cambisol), and topography (steep slopes), whereas they differ considerably in terms of forest coverage. Although forest completely covers the Sperbelgraben, only about the half of Rappengraben is covered by forest, and the remaining part is used as pasture (Stähli et al., 2011).

The catchment of Dorfbach Meilen (4.6 km²) and that of the Reppisch up to Birmensdorf (22 km²) are both located on the Swiss Plateau (Antonetti, Buss, Scherrer, Margreth, & Zappa, 2016). Both catchments are mainly covered by grassland and forest and, to a lesser extent, arable land and settlements, and they are characterised by the Upper Freshwater Molasse with conglomerate in the shallow subsurface (Bolliger, 1999; Hantke, 1967; Pavoni, Jäckli, & Schindler, 1992). Cambisols with normal permeability and storage capability cover most of the catchments, whereas soils with low permeability are less

widespread. The Ilfis catchment (188 km²) is located in the upper Emmental and Entlebuch regions in the cantons of Bern and Lucerne. Nearly half of the catchment is forested, whereas the remaining part is mainly covered by arable land and meadow. The northern part of the catchment is characterised by conglomerates of Upper Freshwater Molasse (i.e., Napf-Nagelfluh), with a normal to low conductivity, whereas a low permeable subalpine Molasse and Flysch can be found in the south-eastern part of the catchment. Cambisol and Regosol are the most widespread soils in the catchment.

2.2 | The process maps

The runoff processes in the study catchments were mapped based on of the decision schemes of Scherrer and Naef (2003), which allow the DRP to be determined at the plot scale on the basis of the hydrological properties of the surface and the soil. Information on the process intensity is provided with a number from 1 to 3 beside the DRP, where 1 represents an almost immediate reaction, 2 a slightly delayed one, and 3 a strongly delayed one. However, interactions between different DRPs on a given hillslope profile ("process catena"; Schmocker-Fackel et al., 2007) and the connectivity of an area to the river network can significantly influence the contribution to runoff of a given area. During the mapping, therefore, the information about the DRPs at the plot scale is scaled up to the catchment scale, and the DRPs are reclassified into five classes (called "runoff types") according to the intensity of the contribution to runoff. For this study, two upscaling methods were used for scaling up the DRPs from the plot to the catchment scale: the manual method described in Scherrer AG (2006) and the automatic one based on Schmocker-Fackel et al. (2007). The first method is based on expert knowledge and is performed manually. The second approach is an enhancement of Scherrer AG (2006) and relies on soil maps with a high resolution and on the conversion criteria reported in Table 3. Where information on soil is unavailable, the expert-based soil prediction model of Margreth, Naef, and Scherrer (2010) is used. Basically, the two methods differ from each other in terms of time required for upscaling. Although several days of fieldwork are necessary for the manual mapping of an area, the most time-expensive step of the automatic method is its configuration for a new basin, which depends on the available information. However, some days of fieldwork are also necessary for the automatic approach, as the algorithm needs

to be first calibrated against manually derived maps on a few small test areas and then validated at selected locations within the catchment (Margreth et al., 2010). This procedure makes the automatic method more attractive for large areas than the manual one. Therefore, the process map of the largest study catchment (Ilfis, 186 km²) was derived with the automatic approach of Schmocker-Fackel et al. (2007), whereas manually derived maps were available for the catchments Reppisch and Dorfbach Meilen from a previous study (Antonetti, Buss et al., 2016). Given their proximity to the Ilfis catchment, also Sperbelgraben (0.5 km²) and Rappengraben (0.6 km²) were mapped with the automatic approach. Antonetti, Buss, Scherrer, Margreth, and Zappa (2016) compared the two methods and found that the automatic mapping approach of Schmocker-Fackel et al. (2007) yields the most similar results to those of Scherrer AG (2006) in terms of extent and distribution of runoff types. For a more detailed description of the mapping approaches and their differences, we refer to Antonetti, Buss et al. (2016).

2.3 | RGM-PRO

RGM-PRO is a further development of the runoff generation module used by Antonetti, Scherrer, Kienzler, Margreth, and Zappa (2016). For its use, information on the spatial distribution of runoff types and spatially distributed rainfall data need to be provided (Figure 2). RGM-PRO is event based, meaning that, for its initialisation, it needs information on the antecedent wetness conditions of the catchment, which could potentially be provided by any grid-based hydrological model or even measured (e.g., Parajka et al., 2005). For this study, the plant available soil moisture was assimilated from grid-based simulations of the PREVAH hydrological modelling system (Section 2.3.3).

2.3.1 | Configuration

On the basis of a digital terrain model with a 25-m resolution, each study catchment was divided into subcatchments up to 2 km² in size with the Topographic Analysis Tool (TANALYS) (Schulla, 1997). The runoff generation was therefore computed for each subcatchment. To do this, a grid-based discretisation was chosen with a grid size of 500 m × 500 m, and a specific configuration was designed to deal with both the spatial variability of the rainfall data and the spatial heterogeneity of the runoff types. So that the subgrid variability of the runoff types can be accounted for, the percentage of each runoff type within each grid cell was first calculated. The runoff was then calculated for each cell as if there were one single runoff type for the entire cell. The total runoff was finally calculated as a weighted average. This approach limits computational effort while avoiding information loss due to grid resolution and has already been adopted by Carver et al. (2009) and Nijzink et al. (2016).

The runoff concentration to the outlet of the subcatchment is then calculated for both overland flow and subsurface flow. For the first, the flow times calculated with TANALYS are considered; for the second, a linear storage with one storage constant is used. The outflow of each subcatchment is finally routed to the main outlet according to the flow times calculated with a Strickler coefficient of 30 m^{1/3} s⁻¹ (Schulla, 1997).

TABLE 3 Reclassification of DRPs according to RTs

RT	DRP	Runoff intensity
1	HOF1/2, SOF1	Fast
2	SOF2, SSF1	Slightly delayed
3	SSF2	Delayed
4	SOF3, SSF3	Strongly delayed
5	DP	Not contributing

Note. Adapted from Naef, Scherrer, Thoma, Weiler, and Fackel (2000). 1 represents an almost immediate reaction, 2 a slightly delayed one, and 3 a strong delayed one.

DP = deep percolation; DRP = dominant runoff process; HOF = Hortonian overland flow; RT = runoff type; SOF = saturation overland flow; SSF = subsurface flow.

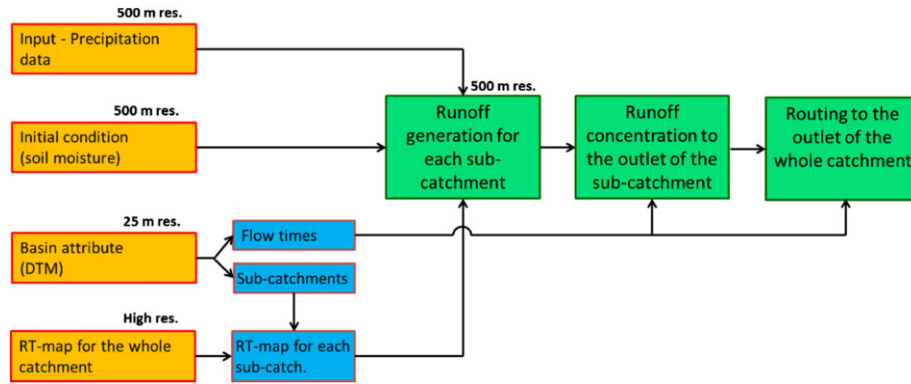


FIGURE 2 Flow diagram of the configuration of process-based runoff generation module used in this study. DTM, digital terrain model; RT, runoff type

2.3.2 | Structure

The structure of RGM-PRO is based on that of the traditional runoff generation module of PREVAH (Gurtz et al., 2003; Lehning et al., 2006; Zappa & Gurtz, 2003), which follows, in turn, the ideas governing the runoff generation of the HBV model (Bergström, 1976). It consists of a plant available soil moisture storage, a storage system for the runoff generation controlled by four parameters for each runoff type, and the same groundwater storage as in RGM-TRD (Gurtz et al., 2003; Figure 3). The precipitation can either go into the plant available soil moisture storage (SSM1–5) or enter directly into the runoff generation storages (SUZ1–5). A nonlinearity parameter BETA set equal to 3 controls the partitioning of water between the soil moisture storages and the runoff generation modules, where the storage times for the surface runoff (K0H1–5) and subsurface runoff (K1H1–5) regulate the generation of the runoff. The thresholds for quick runoff formation (SGRLUZ1–5) determine the separation between surface and subsurface runoff. Maximum percolation rates (CPERC1–5) control the percolation to the groundwater storage. This is divided into a quick-leaking storage (SG1) and two slow-leaking storages (SG2 and SG3) and is controlled by three parameters (SLZ1MAX, CG1H, and K2H). For a more detailed description of the groundwater storage system, we refer to Viviroli, Zappa et al. (2009) and Schwarze, Dröge, and Opherden (1999).

2.3.3 | Assimilation and downscaling of soil moisture

One of the problems of event-based models is the definition of initial conditions. For this study, the plant available soil moisture was

assimilated from grid-based simulations of PREVAH with a resolution of 500 m. These simulations have been computed in real-time since 2012 for the whole of Switzerland as part of the <http://www.drought.ch> platform (Zappa et al., 2014; last access 2.12.2016). Retrospective simulations and initial conditions are available for the period 1981 to 2016. Because the spatial variability of the soil moisture is higher than the resolution of the PREVAH simulations, the downscaling technique described in Blöschl, Komma, and Hasenauer (2009) was applied. This method relies on three basic assumptions:

- The soil moisture pattern at the smaller scale is time invariant.
- The spatial variance of soil moisture at the smaller scale is linked with that at the larger scale by a scaling theory.
- Soil moisture is mass conserving.

The first assumption allows a static pattern (called fingerprint) to be used. In this study, the process maps were used as fingerprints because they already include information about the spatial distribution of soil moisture (Scherrer et al., 2007). As a consequence of the second assumption, the spatial variance of soil moisture at the smaller scale (σ_S^2) was linked to that at the larger scale (σ_L^2) on the basis of following scaling theory:

$$\sigma_S^2 = \sigma_L^2 \cdot \left(\frac{L_S}{L_L} \right)^{-\alpha}, \quad (1)$$

where L_S and L_L are the length scales (i.e., the grid sizes) and α is an empirical exponent set equal to 0.35 according to Blöschl et al.

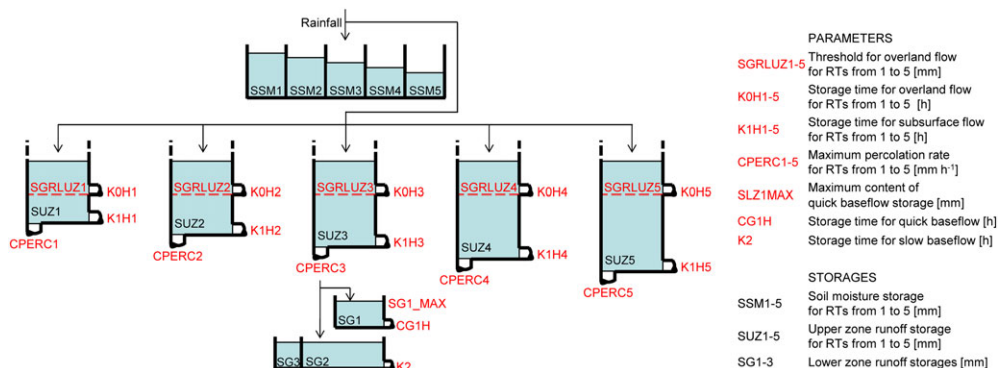


FIGURE 3 Schematic representation of the structure of the process-based runoff generation module. RT, runoff type

TABLE 4 Plausible parameter ranges defined a priori for each RT

RT (DRPs)	SGRLUZ (mm)	K0H (h)	K1H (h)	CPERC (mm/h)
1 (SOF1, HOF)	0–40	0.05–0.4	1000	0.1
2 (SOF2, SSF1)	40–100	0.05–0.4	0.5–2	0.1
3 (SSF2)	40–100	0.05–0.4	2–4	0.1–0.5
4 (SOF3, SSF3)	100–200	0.05–0.4	2–4	0.5–5
5 (DP)	>200	0.05–0.4	1000	5–50

Note. DP = deep percolation; DRP = dominant runoff process; HOF = Hortonian overland flow; RT = runoff type; SOF = saturation overland flow; SSF = subsurface flow.

(2009). Owing to the last assumption, the mean soil moisture at the smaller scale was forced to be equal to the mean soil moisture at the larger scale. After the soil moisture was downscaled to a resolution of 25 m, it was successively reaggregated to obtain an averaged value for each runoff type for each grid cell.

2.4 | A priori parameter allocation of RGM-PRO

2.4.1 | Defining plausible parameter ranges

On the basis of the results of the sprinkling experiments mentioned in Section 2.1, on physical properties of soils, and on the field expertise of the authors who mapped the runoff types in the investigated areas, plausible value ranges were defined a priori for each parameter of RGM-PRO (Table 4). With regard to the storage capacity of soils, the values observed during the field observations ranged from 8 to 240 mm (Kienzler, 2007; Scherrer, 1997; Schmocker-Fackel, 2004). The evaluation of the falling limb of the hydrograph of the sprinkling experiments allowed experimentally observed storage constants to be determined. For the overland flow (K0H1–5), values between 0.05 and 0.4 h were obtained. With regard to the subsurface storm flow, a value around 0.5 h for SSF1 and between 2 and 4 h for SSF2 and SSF3, respectively, were considered plausible. Concerning the percolation rates, a wide range, from 0 to 90 mm/h, was observed from the sprinkling experiments. With regard to the runoff concentration, the storage constant of the linear storage for the concentration of subsurface flow was set to values between 1 and 3 h. These values are in agreement with those of Reszler, Komma, Blöschl, and

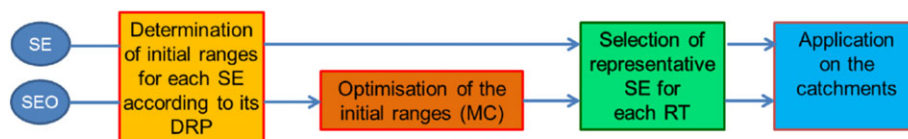
Gutknecht (2006), who completed an a priori parameter allocation of the KAMPUS model.

2.4.2 | Strategies for parameter allocation

Four strategies for the parameter allocation of RGM-PRO were designed and can be grouped into those based on the sprinkling experiments and those based on the runoff types (Figure 4). In the first case, the basic idea was to select a single sprinkling experiment to represent the whole runoff type, according to Table 3. Once one representative sprinkling experiment was chosen for each runoff type, the initial ranges described in the previous section were assigned to each of the four parameters of RGM-PRO (SGRLUZ, K0H, K1H, and CPERC), according to its DRP and runoff type. For example, because the sprinkling experiment 5/2 (Willerzell, hillslope) is characterised by SSF2, it was selected to represent runoff type 3. An initial range of 40 to 100 mm was therefore assigned to SGRLUZ3, 0.05 to 0.4 h to K0H3, 2 to 4 h to K1H3, and 0 to 50 mm/h to CPERC3. Where HOF or DP was expected, the subsurface flow was neglected by setting K1H to a high value (1,000 h). Four possible combinations of representative sprinkling experiments were tested (Table 5). In the second strategy based on the sprinkling experiments, the initial ranges were further constrained by considering only the parameter values, which led to the best 1% of a Monte Carlo simulation with 10,000 runs. As objective function, the averaged value of the Nash–Sutcliffe efficiency (Nash & Sutcliffe, 1970), calculated against observations of both overland and subsurface flow during the sprinkling experiment, was considered.

The second group of strategies is based on the response curves of the runoff types (Figure 5; VAW, 1994). These curves are idealised results from the sprinkling experiments and represent the expected behaviour of the correspondent runoff type in terms of intensity to runoff contribution. In the first case, the initial ranges of each model parameter were defined a priori for each runoff type, according to the characteristics of the DRPs belonging to it (Table 3). With regard to the partitioning of runoff within those runoff types, where different DRPs can occur (e.g., runoff type 2, where both SOF2 and SSF1 can take place; see Table 3), the parameter ranges were defined in a manner that allows equifinal combinations to be considered (Beven, 2006). As a result, overland flow and subsurface flow can be

Parameter allocation strategies based on sprinkling experiments



0.05–0.4 Parameterisations based on runoff types

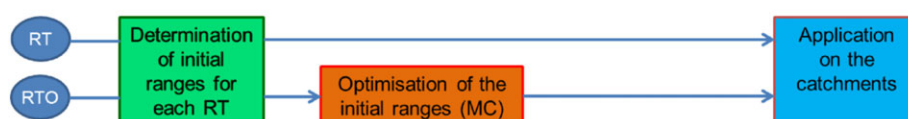
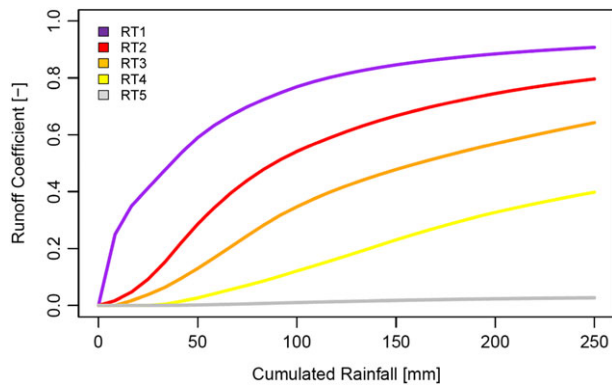


FIGURE 4 Schematic representation of the four parameterisation strategies of process-based runoff generation module. MC = Monte Carlo simulation; RT = runoff type; RTO = runoff type, optimised; SE = sprinkling experiment; SEO = sprinkling experiment, optimised

TABLE 5 The four different combinations of SEs selected to represent one of the five RTs

	SE	SE1	SE2	SE3
RT1	2	1	2	1
RT2	3/1	3/1	1	2
RT3	5/2	5/2	5/2	4
RT4	7	7	7	8/1
RT5	9	9	9	8/2

Note. RT = runoff type; SE = sprinkling experiment.

**FIGURE 5** Response curves of the five runoff types (RTs) as defined by VAW (1994)

partitioned in different ways, provided that the total contribution to runoff reflects that of the correspondent response curve. By doing so, the successful simulation of each sprinkling experiment is not guaranteed anymore because the response curves of the runoff types are referred to the total runoff.

In the second configuration, similarly to the strategies based on the sprinkling experiments, the ranges were optimised against the characteristic response curve of each runoff type, by considering only the 1% best runs of a Monte Carlo simulation with 10,000 runs. As response curves instead of hydrographs are used for the optimisation, the root mean square error was used instead of Nash–Sutcliffe efficiency as objective function.

RGM-PRO was therefore applied to the five study catchments with these four different sets of initial ranges. The set leading to the best results was used for the comparison with RGM-TRD.

2.5 | Comparison of runoff generation modules

RGM-PRO was tested on the study catchments for the long-lasting rainfall events listed in Table 6. These events were chosen mainly during the summer period to avoid snow-related processes that can interfere with the different runoff processes. As input data, a combination of measured rainfall data and radar data with an hourly resolution was used (CombiPrecip product, Sideris, Gabella, Erdin, & Germann, 2014). At the beginning of each simulation, the plant available soil moisture was assimilated from grid-based simulations of the traditional PREVAH with a resolution of 500 m, and downscaled according to Blöschl et al. (2009). So that an insight into the parameter uncertainty

TABLE 6 Start and end of the simulated precipitation events

Ilfis, Sperbelgraben, and Rappengraben			Reppisch and Meilen		
Name	Simulation start	Simulation end	Name	Simulation start	Simulation end
Aug05	01.08.2005	31.08.2005	Aug05	01.08.2005	31.08.2005
Sep06	15.09.2006	30.09.2006	Jun13	30.05.2013	14.06.2013
Aug07	18.07.2007	17.08.2007	Jul14	09.07.2014	16.07.2014
Aug10	20.07.2010	09.08.2010	Jun15	14.06.2015	17.06.2015
Jun12	01.06.2012	20.06.2012	Jun16	08.06.2016	23.06.2016
Sep12	23.08.2012	18.09.2012			
Aug14	21.07.2014	20.08.2014			
May16	11.05.2016	18.05.2016			

can be gained, RGM-PRO was run with 10 different combinations of parameter values, which were randomly selected within the ranges defined a priori. The value distribution within each range was assumed to be uniform.

The results obtained with RGM-PRO were compared with those obtained with different configurations of RGM-TRD. These configurations are described in the following text, and an overview is given in Table 7. Basically, two issues were investigated: first, whether using information on the spatial distribution of runoff types within a catchment is actually advantageous for hydrological simulations, and second, whether the bottom-up approach introduced in this paper can be used in a regionalisation framework, assuming that, once a module structure and its parameters have been determined for each runoff type (Figure 4), they can be transferred to an ungauged catchment where the same runoff type occurs (Antonetti, Buss et al., 2016; Beran, 1990).

To test the first hypothesis, the simulation results obtained with RGM-PRO were compared with those obtained with two configurations of RGM-TRD. In the first case (TRD-2000), a Monte Carlo simulation with 2,000 runs was performed for each catchment and for each rainfall event. By doing so, the simulation ability of RGM-TRD on each study catchment was investigated. In addition, by focussing exclusively on the best runs of the same Monte Carlo simulation, insight was gained into whether the a priori parameterised RGM-PRO can lead to better results compared with the calibrated RGM-TRD. In the second configuration (TRD-1st10), similarly to what was done for RGM-PRO, only the first 10 runs of the above-mentioned Monte Carlo simulation were considered. This allowed the parameter uncertainty of RGM-PRO and the one of the uncalibrated RGM-TRD to be compared.

To test the transferability of RGM-PRO, its simulation results were compared with those from two other typical regionalisation techniques. In the TRD-ParTrans configuration, RGM-TRD was first calibrated on a specific catchment during a single event. The best 10 parameter sets were then transferred in space and time to the other catchments. The robustness of this configuration was additionally investigated by varying the donor catchments and the calibration events with a leave-one-out cross-validation. In a different configuration, from here on referred to as TRD-RHQ, RGM-TRD was fed

TABLE 7 Overview of the comparison between RGMs

TRD-2000		TRD-1st10		TRD-ParTrans	TRD-RHQ	RGM-PRO
Scope of the comparison	Testing the added value of process-based hydrological modelling			Testing the transferability to ungauged catchments		
Precipitation data				CombiPrecip (Sideris et al., 2014)		
Spatial and temporal res.		1 km; 1 h				
Soil moisture data				PREVAH real-time simulations (Zappa et al., 2014)		
Spatial and temporal res.		500 m; 1 h				Within each grid cell, one value for each RT (Blöschl et al., 2009)
Parameters		One set for the whole catchment			One set each grid cell	One set each RT
Calibration	No	Yes	No	Yes	Yes	No
Sampling strategy	All 2000 runs from MC	Best 10 runs from MC	First 10 runs from MC	Best 10 runs from MC on Sperbelgraben—Sep06	Viviroli et al. (2009)	First 10 runs from MC
Parameter ranges			From Viviroli et al. (2009)			From expert knowledge and optimised against RTs

Note. MC = Monte Carlo simulation; RGM = runoff generation module; RT = runoff type.

with the regionalised parameter found by Viviroli, Mittelbach, Gurtz, and Weingartner (2009), who developed a parameter regionalisation scheme on the basis of the results of 140 calibrated catchments for flood prediction in ungauged catchments. RGM-TRD was therefore adapted to cope with the spatial heterogeneity of the model parameters.

So that a fair comparison between the runoff generation modules can be guaranteed, the interception storage of the configurations of RGM-TRD was switched off, because the interception process is not reproduced by RGM-PRO. In their original study, Viviroli, Mittelbach et al. (2009) calculated a spatially distributed adjustment factor for precipitation, ranging from −30% to +30%. However, this factor was not applied to TRD-RHQ.

2.5.1 | Objective functions

Model simulations are evaluated with a specific focus on simulated peak runoff and total event volume. As the traditional Nash–Sutcliffe efficiency (Nash & Sutcliffe, 1970) does not give exhaustive information about the error nature, the Kling–Gupta efficiency (KGE; Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009) was used for this study:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2}, \quad (2)$$

where r represents the correlation between simulated and measured runoff, α is the ratio between the standard deviation of the simulated runoff and that of the measured runoff, and β is the ratio of the mean simulated to mean observed discharge. In addition, the series distance (Ehret & Zehe, 2011) method was used to evaluate the temporal and volumetric shift between simulated and measured hydrographs. Recently, this metric was further developed by Seibert, Ehret, and Zehe (2016), who introduced an algorithm for a scale-independent definition of hydrographs and a concept for taking uncertainty into account. However, as our study was designed prior to publication of

that work, the innovations of Seibert et al. (2016) were not used to evaluate our simulations.

3 | RESULTS

3.1 | Best option for the a priori parameter allocation

The initial ranges defined a priori on the basis of expert knowledge allowed RGM-PRO to successfully simulate the overland and the subsurface flow of the sprinkling experiments (Figures 6 and S1) and the response curves of the runoff types (Figures 7 and S2). In the case of Bilten (Figure 6a), the most sensitive parameter was the maximum percolation rate CPERC. However, CPERC values between 1.5 and 2.5 mm/10 min, although allowing the overland flow to reach the measured steady runoff coefficient (i.e., the ratio between runoff and precipitation) of approximately 0.9, are definitely too high for a HOF1 site. In Willerzell hillslope (Figure 6b), the threshold for the activation of overland flow SGRLUZ was the most sensitive parameter, and values smaller than 30 mm, together with high percolation rates, allowed the measured hydrographs to be well reproduced.

The successful reproduction of the sprinkling experiments did not guarantee that the hydrographs of the study catchments were well simulated. During the event between May 12 and the May 15, 2016, on the Ilfis catchment, for example, the simulated hydrographs showed a higher smoothness compared with the observed one, independently from the parameter allocation strategy used. However, the strategies based on the sprinkling experiments underestimated both the runoff peaks and the runoff volume, whereas the ones based on the response curves of the runoff types performed better (Figure 8a). The same tendency was observed for the other catchments and events, and the selection of different representative sprinkling experiments for one or more runoff types did not change the result (Figure 8b). The strategy optimised against the response curves performed slightly better than

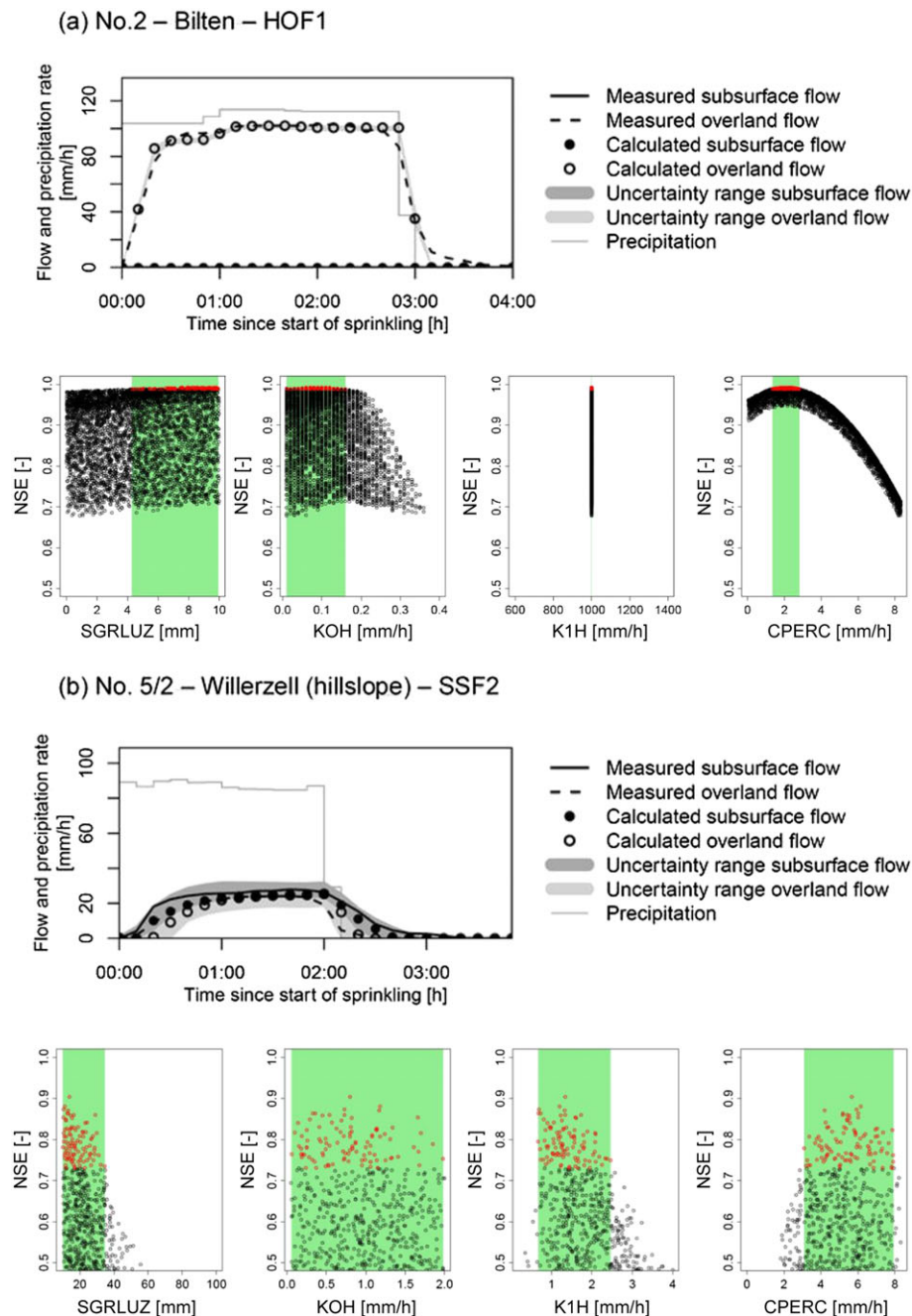


FIGURE 6 Hydrographs and dot plots obtained from the simulation of sprinkling experiment (a) no. 2 (Bilten) and (b) no. 5/2 (Willerzell, hillslope) with the process-based runoff generation module. The red dots in the dot plots refer to the best 1% of a Monte Carlo simulation with 10,000 runs, and the green rectangles highlight the optimised parameter ranges

that without optimisation and was therefore chosen for the comparison with RGM-TRD.

3.2 | Comparison of runoff generation modules

When applied on the same catchments with the same precipitation input, RGM-PRO and RGM-TRD produced different results. For example, on the Sperbelgraben, Rappengraben, and Ilfis catchments during the event on May 15, 2016, both the runoff peaks and volume were well reproduced by RGM-PRO, whereas TRD-ParTrans and TRD-RHQ underestimated the runoff signal (Figure 9). Only the falling limb of the hydrograph was reproduced better by RGM-

TRD. Figures 10 and 11 show how RGM-PRO performed well on all the study catchments during nearly all the simulated events, and outperformed the uncalibrated TRD-1st10 in terms of highest performance and simulation uncertainty. In some instances, RGM-PRO even exceeded the performance of the calibrated RGM-TRD (represented by the upper part of the boxplots of TRD-2000 in Figures 10 and 11).

When compared with the other regionalisation techniques, RGM-PRO performed better than TRD-RHQ and TRD-ParTrans (in Figures 9, 10, and 11, configured by choosing the Sperbelgraben as the donor catchment and September 2006 as event for calibration of TRD-ParTrans). However, choosing another donor catchment and/or event

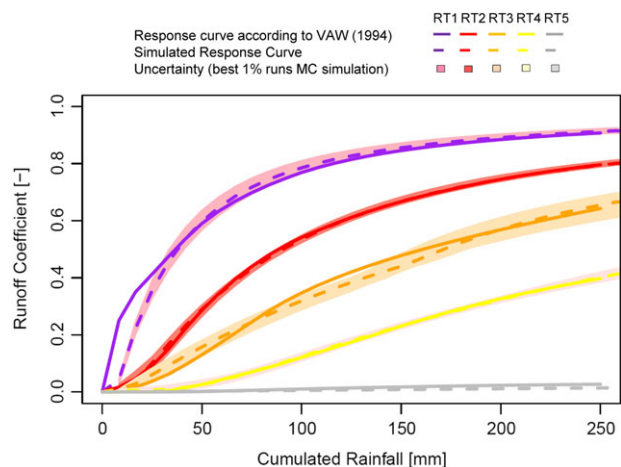


FIGURE 7 Simulated response curves and hydrographs for the five runoff types (RTs)

for the calibration of TRD-ParTrans would have led to different results, especially for the small Rappengraben and Sperbelgraben catchments (Figure 12). Only using the Ilfis catchment, the largest among those investigated, as the donor catchment seems to lead to the most robust calibrated parameter sets to be transferred to other areas. Using the boxplots of Figure 12 as a proxy for uncertainty leads to the finding that RGM-PRO produced the lowest uncertainty among the model configurations.

The results from series distance (Ehret & Zehe, 2011) provide further information regarding the simulation skills of the runoff generation modules. For example, on the Reppisch catchment, RGM-PRO provided the best simulation of the rising limbs in both temporal and volumetric terms, whereas both TRD-ParTrans and TRD-RHQ

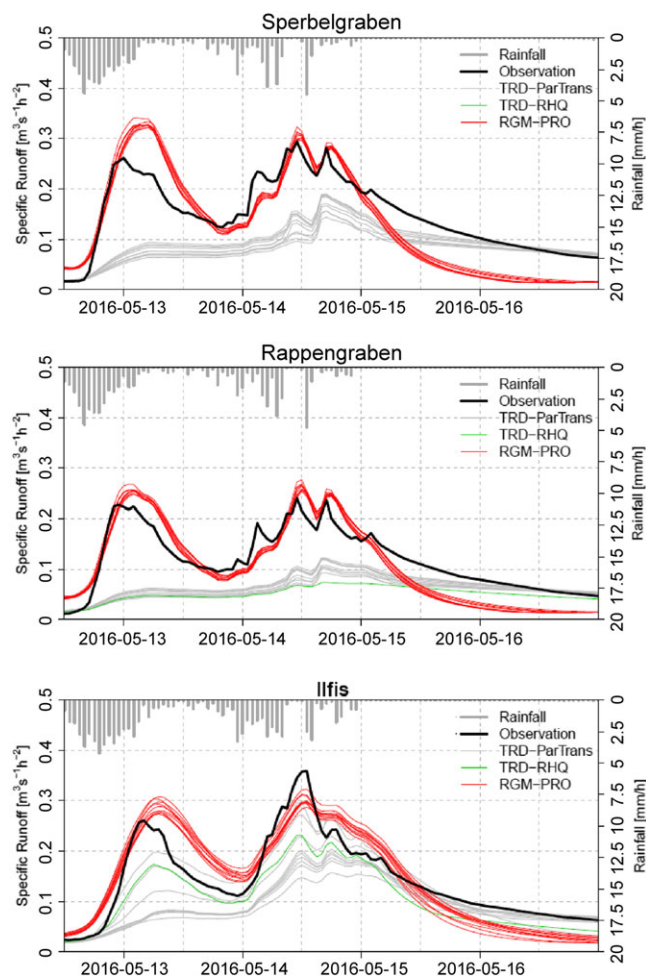


FIGURE 9 Simulated runoff during the event between May 12 and 15, 2016, obtained from TRD-ParTrans, TRD-RHQ, and process-based runoff generation module (RGM-PRO)

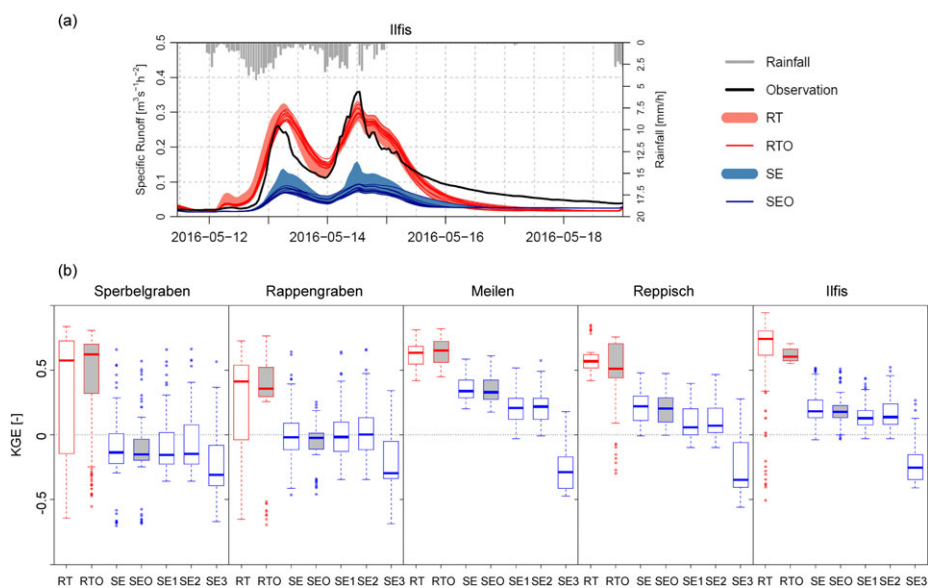


FIGURE 8 (a) Simulated runoff during the rainfall event on July 28 and 29, 2014, obtained from the four different parameter allocation strategies. (b) Results of the simulated events on the five study catchments. Each boxplot represents the performances of 10 model runs for each event. Red (blue) boxplots refer to the parameter allocation strategy based on the runoff types (sprinkling experiments). Grey (white) fill refers to parameter allocation strategies with (without) optimisation. RT = runoff type; RTO = runoff type, optimised; SE = sprinkling experiment; SEO = sprinkling experiment, optimised

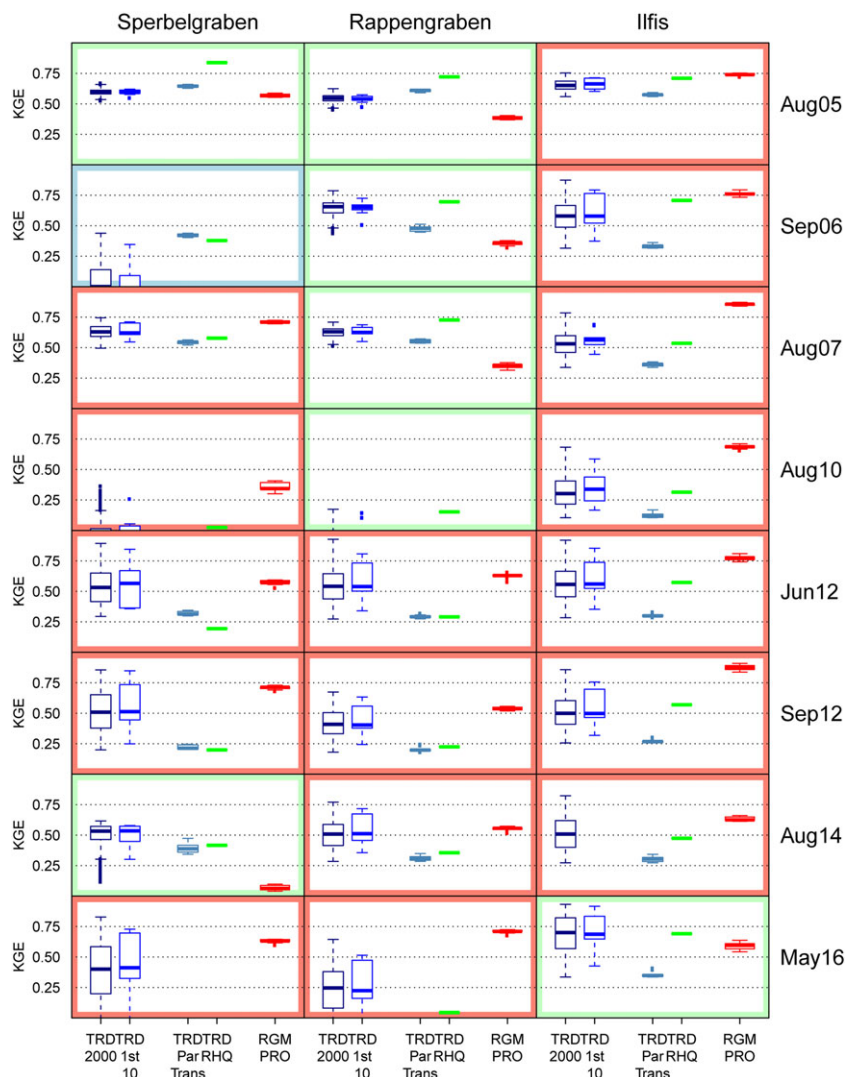


FIGURE 10 Results from the eight events simulated on the Sperbelgraben, Rappengraben, and Ilfis catchments. The boxplots represent the simulation results of the different model configurations. The coloured frame indicates which model simulated the event best. TRD-ParTrans was calibrated on the Sperbelgraben during the event of September 2006. KGE, Kling-Gupta efficiency

underestimated the amplitude of the rising and falling limbs in nearly all the simulated events (Figure 13a). The results look similar for the other study catchments (Figure 13b), with some exceptions. On the Ilfis catchment, for example, TRD-ParTrans generally reproduced the falling limb of the events better than TRD-RHQ and RGM-PRO did, whereas on the Sperbelgraben, RGM-PRO did not improve the volumetric estimation of the simulated events.

4 | DISCUSSION

4.1 | Parameter allocation of RGM-PRO

One of the main purposes of this study was to develop a process-oriented modelling approach on the basis of the DRP concept, consisting of an event-based conceptual runoff generation module (RGM-PRO), and an a priori parameter allocation strategy for its application on ungauged catchments. RGM-PRO was able to simulate both overland and subsurface flow of the sprinkling experiments. Other studies reached similar results with computationally highly demanding models (Faeh et al., 1997; Steinbrich et al., 2016). In this study, we managed to reproduce the hydrographs with a conceptual, storage-based

runoff generation module controlled by physically meaningful parameters, for which plausible parameters were defined a priori on the basis of expert knowledge.

Not surprisingly, the same parameter ranges did not lead to satisfying results when applied on larger catchments, where both runoff peaks and volumes were strongly underestimated. This is mainly due to two factors. The first one is linked to the high percolation rates (in some cases even larger than 50 mm/h) inferred from the Monte Carlo simulations. Such high rates simply represent an attempt to cope with the unavoidable side leakage losses, which occurred during the measurement of both overland and subsurface flow (Scherrer et al., 2007). This error due to overfitting propagated clearly throughout the study catchment. The second factor is linked with the concept of “uniqueness of place” (Beven, 2000, 2002). As shown by Scherrer et al. (2007), the sprinkling experiments are often characterised by a unique combination of one DRP and one or more subordinate runoff processes, which can influence the intensity of the contribution to runoff, and, therefore, the runoff type. Figure 14 and Table 8 show how locations that are subject to a certain DRP according to the decision schemes of Scherrer and Naef (2003) can actually contribute to runoff in a different manner than expected. Arbitrarily choosing a single sprinkling experiment to represent a whole runoff type should therefore be avoided.

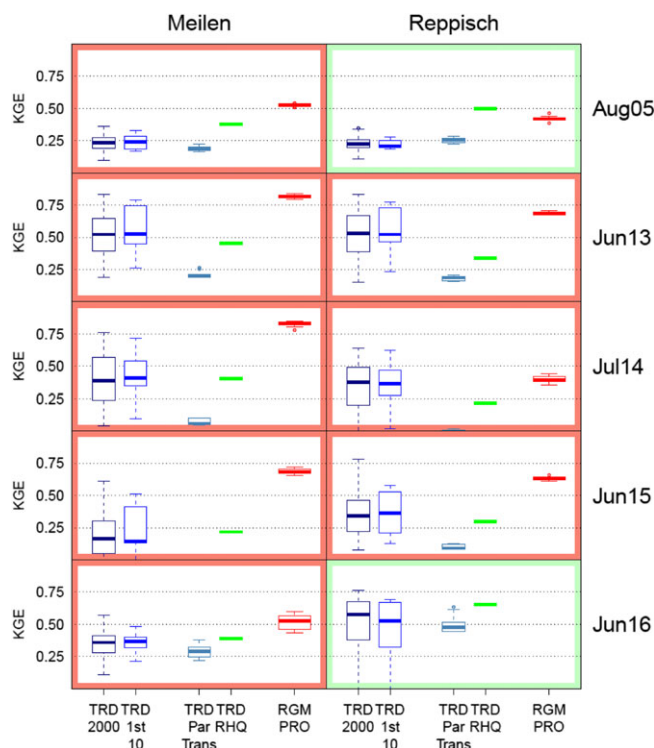


FIGURE 11 Results from the five events simulated on the Meilen catchment and on the Reppisch catchment up to Birmensdorf. The boxplots represent the simulation results of the different model configurations. The coloured frame indicates which model simulated the event best. TRD-ParTrans was calibrated on the Sperbelgraben during the event of September 2006. KGE, Kling-Gupta efficiency

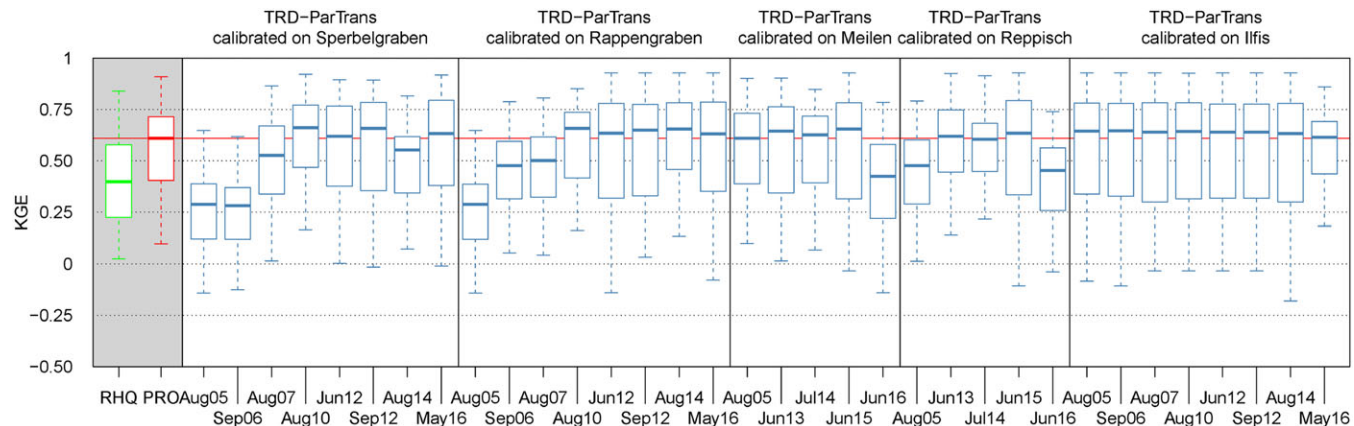


FIGURE 12 Results from the leave-one-out cross-validation of TRD-ParTrans. Each blue boxplot represents the simulation results obtained for all the study catchments with the 10 best parameter sets obtained by calibrating TRD-ParTrans on the catchment indicated in the title during the event indicated on the x axis. For comparison, the performances of TRD-RHQ and the process-based runoff generation module (RGM-PRO) are shown on the left, and the red horizontal line represents the median Kling-Gupta efficiency (KGE) reached by RGM-PRO.

In contrast, defining a priori plausible parameter ranges, and optimising them against idealised response curves for each class of a process map, has been proved to be a promising and straightforward technique for the application of RGM-PRO at the catchment scale. A similar parameter allocation strategy is already implemented in the QAREA model family (Horat, 2000; Smoorenburg, 2015; VAW, 1994). With the approach presented in this study, however, the initialisation problems of QAREA mentioned in the introduction have been removed, and any spatially distributed soil moisture data can be used to initialise RGM-PRO.

4.2 | Added value of process-based hydrological modelling

The simulation results obtained with RGM-PRO are promising, given that its performance was nearly always similar or even higher than that of the calibrated RGM-TRD. The low performances achieved in some cases (e.g., the event in August 2010 on Sperbelgraben and Rappengraben; Figure 10) can be explained by a biased spatial distribution of the precipitation data through time, which affected the results of all the runoff generation modules. More generally, the results of our

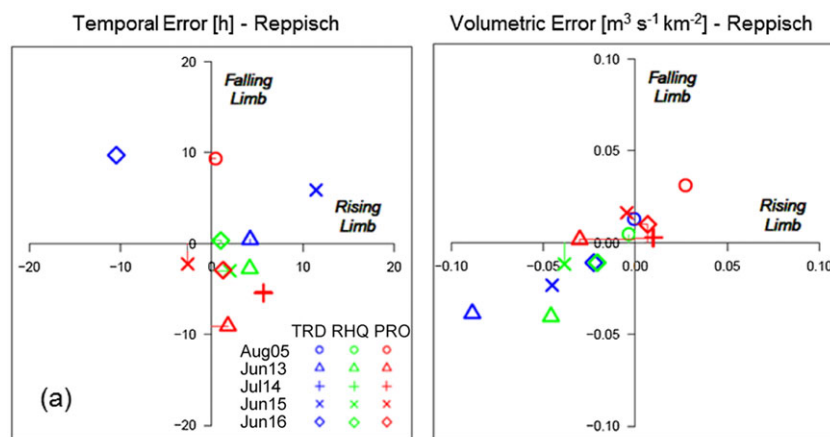


FIGURE 13 (a) Temporal and volumetric error calculated with the series distance (Ehret & Zehe, 2011) approach on the Reppisch catchment. Each dot corresponds to an event simulated either with TRD-ParTrans (blue), TRD-RHQ (green), or process-based runoff generation module (RGM-PRO; red). A vertical (horizontal) segment indicates, for each event, which model provided the best simulation of the rising (falling) limb of the hydrograph. (b) Scores calculated for all study catchments based on the series distance approach. For each event, the model configuration that performs best receives a point. The different background colours indicate the model configuration that performed best on the given catchment. A gradient is used in case of parity

	Temporal shift – Rising Limb			Temporal shift – Falling Limb		
Sperbelgraben	2	2	4	1	2	4
Rappengraben	0	1	7	1	0	7
Meilen	0	1	4	0	0	5
Reppisch	0	2	3	2	1	2
Ilfis	1	0	7	4	0	4

	Volumetric shift – Rising Limb			Volumetric shift – Falling Limb		
Sperbelgraben	2	3	3	2	3	2
Rappengraben	3	0	5	3	1	4
Meilen	0	0	5	0	2	3
Reppisch	1	1	3	0	2	3
Ilfis	0	1	7	5	0	3

	TRD-ParTrans	TRD-RHQ	RGM-PRO	TRD-ParTrans	TRD-RHQ	RGM-PRO
Sperbelgraben	Blue	Green	Orange	Blue	Green	Orange
Rappengraben	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
Meilen	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
Reppisch	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
Ilfis	Orange	Orange	Orange	Blue	Orange	Orange

study show that, given the same uncertainties in the input data, the use of information on the spatial distribution of runoff processes allows the simulation results to be improved and the spatial representation of runoff within the catchment to be in agreement with the hydrologist's perception of the catchment functioning. This finding is in agreement with that of Nijzink et al. (2016), who improved the

internal dynamics of mHMtopo by incorporating subgrid variability on the basis of DRPs derived with a topography-based approach (Gharari et al., 2011). In contrast, Casper et al. (2015) did not observe any improvement at the gauging site with a process-based parameterisation of LARSIM (Bremicker, 2000), and Hellebrand et al. (2011) did not find a clear improvement of their DRP model compared with the conceptual FLEX model (Fenicia, Savenije, Matgen, & Pfister, 2007). However, as already mentioned before, all these studies made use of calibration for the allocation of model parameters, which could have biased the results.

The bottom-up approach presented in this study can be seen as a successful attempt to bridge the gap between experimentalists and modellers (Seibert & McDonnell, 2002). In recent years, several attempts have been made in this direction, but in all of them, the role of the modellers was larger than that of experimentalists (Euser et al., 2015; Gao et al., 2014; Gharari et al., 2014; Nijzink et al., 2016; Savenije, 2010). As a consequence, a top-down approach and strong simplified mapping approaches were mainly used for the modelling. Parameter and process relational rules were therefore used to constrain the model (e.g., FLEX-Topo; Gharari et al., 2014; Savenije, 2010). However, much more information about the reaction of a catchment to rainfall than the one provided by a topography-based landscape classification (Rennó et al., 2008) can be gained and consequently used for model building and constraining. The approach presented here, therefore, represents a framework for the use of all

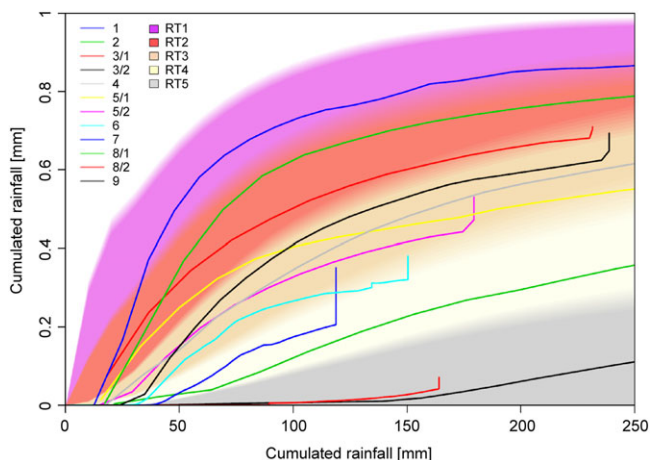


FIGURE 14 Response curves of the 12 sprinkling experiments available for this study. The colours in the background refer to the expected response curves of the five runoff types according to their definition, as given in Naef et al. (2000). RT, runoff type

TABLE 8 DRP, subordinate process, and expected and actual RT of each sprinkling experiment

No.	Location	DRP according to Scherrer and Naef (2003)	Subordinate process according to Scherrer et al. (2007)	Expected RT according to Naef et al. (2000; Table 3)	Actual RT (according to Figure 14)
1	Willerzell (sink)	SOF1	SSF2	RT1	RT1
2	Bilten	SOF1	SSF1	RT1	RT2
3/1	Heitersberg	HOF1	SSF3	RT1	RT2
3/2	Heitersberg	HOF1	SSF3	RT1	RT2–RT3
4	Therwil	SOF2	DP	RT2	RT3
5/1	Willerzell (hillslope)	SSF2	SOF3	RT3	RT3
5/2	Willerzell (hillslope)	SSF2	SOF3	RT3	RT3
6	Luthertal	SSF2	—	RT3	RT3–RT4
7	Schlüssberg	SSF3	—	RT4	RT4
8/1	Therwil	SOF3	DP	RT4	RT4
8/2	Therwil	SOF3	DP	RT4	RT5
9	Reiden	SSF3	DP	RT5	RT5

Note. DP = deep percolation; DRP = dominant runoff process; RT = runoff type; SOF = saturation overland flow; SSF = subsurface flow.

detailed and qualitative knowledge about processes obtained by experimentalists. This knowledge is first used during the phase of mapping the landscape and second during the parameter allocation phase when plausible ranges are defined for each model parameter. The performance of a topographically based landscape classification within a bottom-up framework was already investigated by Antonetti, Buss et al. (2016). The advantages of using more expert knowledge on processes in a top-down approach with parameter and model constraints will be addressed in a future study.

4.3 | Process-based hydrological modelling as a regionalisation approach

Mapping runoff types and using the information on their extent and distribution within an a priori parameterised runoff generation module have proven to be valuable as a regionalisation technique, given that RGM-PRO reached similar performances as TRD-RHQ and TRD-ParTrans. The process-based framework improved the simulation of the hydrographs in both temporal and volumetric terms and has advantages over the other two regionalisation techniques used in this study (i.e., TRD-ParTrans and TRD-RHQ), also in terms of robustness and transferability. As shown in Figure 12, transferring in space and time parameters of a traditional conceptual runoff generation module is a suitable approach only above a certain catchment size (for RGM-TRD this threshold was quantified as 25 km² by Viviroli, Mittelbach et al., 2009), in agreement with expected compensation effects (i.e., error averaging) for mesoscale catchments (Blöschl, 2001). For catchments smaller than this threshold, the parameters being transferred are strongly linked with the choice of the calibration event. As a consequence, the simulation results become less robust. Spatially interpolating calibrated parameter values of a traditional conceptual runoff generation module (TRD-RHQ) is a feasible technique only for those catchments within the area where the regionalisation was designed. Applying the method to another area would imply a considerable initial effort, and the regionalisation results would strongly depend on the number of calibration catchments.

Although it was applied only on five catchments located relatively close to each other, the approach presented in this paper has the potential to be transferred to any temperate catchment, provided that a process map and spatially distributed forcing are available. This transferability test, however, was beyond the scope of this study and will be the object of future research.

4.4 | Limitations of this study

Several limitations of our study need to be addressed in future research. For example, the sensitivity of the model results with respect to the process maps was not investigated. As shown by Antonetti, Buss et al. (2016), simulation results are sensitive to variations in the extent and location of the runoff types within a catchment. A different definition of the representative response curves for each runoff type can also have an effect on the results. In addition, Euser et al. (2015) showed that the model structure can also affect the simulations. For example, taking into account interception could have led to different results, especially during the beginning of an event. The problems linked with the temporal shift and the excessive smoothness of the simulated hydrographs obtained with RGM-PRO could be caused by the greatly simplified representation of the runoff concentration. In fact, the storage time of the linear storage for the concentration of subsurface flow could vary among the different subcatchments, according to their characteristics (e.g., size and drainage density). A different parameterisation of the runoff concentration could therefore have led to better results.

Although the input data used for this study (CombiPrecip product; Sideris et al., 2014) represent the state of the art of spatially distributed rainfall data available in real-time, it is most likely responsible for large uncertainties. Especially with regard to convective rainfall events, the spatial and temporal resolution of the data, as well as the typical problems linked with radar (e.g., screening effects; Germann, Galli, Boscacci, & Bolliger, 2006), still restrict its use for hydrological applications. The same is valid for the initial conditions assimilated from PREVAH simulations, which are affected by uncertainties linked with the quality and resolution of the data used to develop the drought information platform (Zappa et al., 2014). On the Reppisch catchment,

for example, the initialisation of RGM-PRO with soil moisture data with a higher resolution (200 m instead of 500 m) leads to a performance increase (not shown). For a better estimation of the effectiveness of the DRP-based concept presented in this paper, therefore, more reliable forcing data are needed. In addition, significant uncertainties in the measured runoff data cannot be excluded (e.g., Westerberg et al., 2011). Finally, the use of further information besides runoff measurements, for example, from environmental tracers, aerial photographs or maps of saturated areas, could have given further insights into the spatial distribution of performance of the different runoff generation modules (e.g., Güntner, Uhlenbrook, Seibert, & Leibundgut, 1999; Johst et al., 2008; Tetzlaff et al., 2007).

5 | CONCLUSIONS

In this study, we introduced RGM-PRO as an event-based, process-oriented, runoff generation module based on the PREVAH hydrological modelling system, with the aim to improve simulations on ungauged catchments. RGM-PRO makes use of information on the spatial distribution of runoff types, which are defined on the basis of expert knowledge and field work. It was fed with grid-based hourly precipitation data, whereas information on the soil moisture was assimilated and downscaled from continuous simulations of PREVAH.

Trying to allocate the parameter of RGM-PRO a priori on the basis of the hydrographs of sprinkling experiments did not deliver satisfactory results, and this is attributable to the principle of uniqueness of place and side leakage losses. Allocating parameters on the basis of generalised response curves allowed subordinate processes, heterogeneities, and the process catena on the hillslope to be taken into account, and this led to better performances. Compared with the traditional, conceptual runoff generation module of PREVAH, RGM-PRO allows the spatial representation of runoff within the catchment to be more realistic without decreasing the model performance (Seibert & McDonnell, 2002). Also, simulation results of RGM-PRO were better than those obtained with other typical regionalisation techniques based on either parameter transfer or parameter regionalisation in both temporal and volumetric terms. It can therefore be concluded that including information on the spatial distribution of runoff types in a conceptual hydrological model is a feasible technique for performing hydrological simulations on ungauged catchments and for increasing model realism without resorting to the use of calibration. Future research directions should include the evaluation of different sources of uncertainties (e.g., Addor et al., 2014; Zappa, Jaun, Germann, Walser, & Fundel, 2011) and the application to real-time predictions with a focus on nowcasting (e.g., Liechti, Panziera, Germann, & Zappa, 2013).

ACKNOWLEDGMENTS

We thank the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN) for funding the PhD project of the first author. The precipitation data were provided by the Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, whereas the observed runoff series were provided by FOEN and the cantons of Zurich and Bern. We are also grateful to Jan Seibert for discussions about the methodology of the

study, to Melissa Dawes for the English revision of the manuscript, and to Shervan Gharari and another anonymous reviewer for their comments on an earlier version of the manuscript.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Manuel Antonetti and Massimiliano Zappa designed the simulations, Simon Scherrer and Peter Kienzler performed the sprinkling experiments, and Michael Margreth and Simon Scherrer produced the process maps. Manuel Antonetti prepared the manuscript with contributions from all coauthors.

REFERENCES

- Addor, N., Rössler, O., Köplin, N., Huss, M., Weingartner, R., & Seibert, J. (2014). Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments. *Water Resources Research*, 50(10), 7541–7562. <https://doi.org/10.1002/2014WR015549>
- Antonetti, M., Buss, R., Scherrer, S., Margreth, M., & Zappa, M. (2016). Mapping dominant runoff processes: An evaluation of different approaches using similarity measures and synthetic runoff simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(7), 2929–2945. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2929-2016>
- Antonetti, M., Scherrer, S., Kienzler, P. M., Margreth, M., & Zappa, M. (2016). Überprüfung eines prozessnahen Abflussbildungsmoduls auf der Hangskale und in klein- und mesoskaligen Gebieten. In *Forum Für Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung*, 36, 1663–1674.
- Bahreman, A. (2016). HESS Opinions: Advocating process modeling and de-emphasizing parameter estimation. *Hydrology and Earth System Science*, 20(4), 1433–1445. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1433-2016>
- Beran, M. A. (1990). New challenges for regional approach. In M. A. Beran, A. Becker, & O. Bonacci (Eds.), *Regionalization in hydrology, Proceedings of an International Symposium held at Ljubljana, April 1990*. Wallingford: IASH Publication 191.
- Bergström, S. (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI RHO 7. Norrköping.
- Beven, K. J. (2000). Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(2), 203–213. <https://doi.org/10.5194/hess-4-203-2000>
- Beven, K. (2001). How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 1–12. <https://doi.org/10.5194/hess-5-1-2001>
- Beven, K. (2006). A manifesto for the equifinality thesis. In *Journal of Hydrology*, 18–36. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.007>
- Beven, K. (2002). Towards a coherent philosophy for modelling the environment. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 458(2026), 2465–2484. <https://doi.org/10.1098/rspa.2002.0986>
- Beven, K., & Binley, A. (1992). The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6 (May 1991), 279–298. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305>
- Blöschl, G. (2001). Scaling in hydrology. *Hydrological Processes*, 15(4), 709–711. <https://doi.org/10.1002/hyp.432>
- Blöschl, G., Komma, J., & Hasenauer, S. (2009). Hydrological downscaling of soil moisture. Final Report to H-Sat via the Austrian Central Institute for Meteorology and Geodynamics (ZAMG): 1–64. Available at: http://hsaf.meteoam.it/documents/reference/HSF_VS_38_TUWIEN-final-report.pdf
- Blöschl, G., Reszler, C., & Komma, J. (2008). A spatially distributed flash flood forecasting model. *Environmental Modelling & Software*, 23(4), 464–478. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.06.010>
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., & Savenije, H. (2013). Runoff prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139235761>

- Bolliger, T. (1999). *Geologie des Kantons Zürich*, Stiftung Geologische Karte des Kantons Zürich, Ott Verlag, Thun.
- Boorman, D. B., Hollis, J. M., & Lilly, A. (1995). Hydrology of soil types: A hydrologically-based classification of the soils of United Kingdom. Institute of Hydrology (IH) Report. (126): 137. Available at: <http://nora.nerc.ac.uk/7369/>
- Bremicker, M. (2000). Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, Freiburg. Schriften zur Hydrol., (11), 119. Available at: <http://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/band11.html>
- Carver, M., Weiler, M., Stahl, K., Scheffler, C., Schneider, J., Agustin, J., Naranjo, B., & VI, B. C. (2009). Development of a low-flow hazard model for the Fraser basin (British Columbia). MPBI Project 7.29. Victoria, BC.
- Casper, M., Gronz, O., & Gemmar, P. (2015). Process-oriented parameterisation and calibration of a water balance model. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 59(4), 136–144. https://doi.org/10.5675/HyWa_2015_4_1
- Dobmann, J. (2010). *Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz - Interpretations- und Praxishilfe*. Saarbrücken: Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften.
- Dunn, S. M., Soulsby, C., & Lilly, A. (2003). Parameter identification for conceptual modelling using combined behavioural knowledge. *Hydrological Processes*, 17(2), 329–343. <https://doi.org/10.1002/hyp.1127>
- Ehret, U., & Zehe, E. (2011). Series distance—An intuitive metric to quantify hydrograph similarity in terms of occurrence, amplitude and timing of hydrological events. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3), 877–896. <https://doi.org/10.5194/hess-15-877-2011>
- Euser, T., Hrachowitz, M., Winsemius, H. C., & Savenije, H. H. G. (2015). The effect of forcing and landscape distribution on performance and consistency of model structures. *Hydrological Processes*, 29(17), 3727–3743. <https://doi.org/10.1002/hyp.10445>
- Faeh, A. O., Scherrer, S., & Naef, F. (1997). A combined field and numerical approach to investigate flow processes in natural macroporous soils under extreme precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1(4), 787–800. <https://doi.org/10.5194/hess-1-787-1997>
- Fenicia, F., Kavetski, D., Savenije, H. H. G., & Pfister, L. (2016). From spatially variable streamflow to distributed hydrological models: Analysis of key modeling decisions. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/2015WR017398>
- Fenicia, F., Savenije, H. H. G., Matgen, P., & Pfister, L. (2007). A comparison of alternative multiobjective calibration strategies for hydrological modeling. *Water Resources Research*, 43(3), n/a–n/a. <https://doi.org/10.1029/2006WR005098>
- Gao, H., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Gharari, S., & Savenije, H. H. G. (2014). Testing the realism of a topography-driven model (FLEX-Topo) in the nested catchments of the Upper Heihe, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(5), 1895–1915. <https://doi.org/10.5194/hess-18-1895-2014>
- Germann, U., Galli, G., Boscacci, M., & Bolliger, M. (2006). Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(618), 1669–1692. <https://doi.org/10.1256/qj.05.190>
- Gharari, S., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Gao, H., & Savenije, H. H. G. (2014). Using expert knowledge to increase realism in environmental system models can dramatically reduce the need for calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 4839–4859. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4839-2014>
- Gharari, S., Hrachowitz, M., Fenicia, F., & Savenije, H. H. G. (2011). Hydrological landscape classification: Investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(11), 3275–3291. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3275-2011>
- Grayson, R. B., Moore, I. D., & McMahon, T. A. (1992). Physically based hydrologic modeling: 2. Is the concept realistic? *Water Resources Research*, 28(10), 2659–2666. <https://doi.org/10.1029/92WR01259>
- Gronz, O. (2013). Usage of runoff process information in LARSIM. PhD Thesis at the University of Trier. Trier.
- Güntner, A., Uhlenbrook, S., Seibert, J., & Leibundgut, C. (1999). Multi-criterial validation of TOPMODEL in a mountainous catchment. *Hydrological Processes*, 13(11), 1603–1620. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990815\)13:11<1603::AID-HYP830>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990815)13:11<1603::AID-HYP830>3.0.CO;2-K)
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research*, 34(4), 751–763. <https://doi.org/10.1029/97WR03495>
- Gurtz, J., Zappa, M., Jasper, K., Lang, H., Verbunt, M., Badoux, A., & Vitvar, T. (2003). A comparative study in modelling runoff and its components in two mountainous catchments. *Hydrological Processes*, 17(2), 297–311. <https://doi.org/10.1002/hyp.1125>
- Haag, I., Luce, A., Henn, N., & Demuth, N. (2016). Berücksichtigung räumlich differenzierter Abflussprozessarten im Wasserhaushaltsmodell LARSIM. In *Forum Für Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung*, 36, 1651–1662.
- Hantke, R. (1967). *Geologische Karte des Kantons Zürich und seine Nachbargebiete in 2 Blättern 1:50'000*. Zurich.
- Hellebrand, H., Müller, C., Matgen, P., Fenicia, F., & Savenije, H. (2011). A process proof test for model concepts: Modelling the meso-scale. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(1–4), 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.07.019>
- Hellebrand, H., & van den Bos, R. (2008). Investigating the use of spatial discretization of hydrological processes in conceptual rainfall runoff modelling: A case study for the meso-scale. *Hydrological Processes*, 22(16), 2943–2952. <https://doi.org/10.1002/hyp.6909>
- Horat, P. (2000). *QAREA auf True BASIC*. Zurich: Technical Report. ETH Zurich.
- Hrachowitz, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G., McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Pomeroy, J. W., ... Cudennec, C. (2013). A decade of predictions in ungauged basins (PUB)—A review. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1198–1255. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.803183>
- Johst, M., Uhlenbrook, S., Tilch, N., Zillgens, B., Didszun, J., & Kirnbauer, R. (2008). An attempt of process-oriented rainfall–runoff modeling using multiple-response data in an alpine catchment, Loehnersbach, Austria. *Hydrology Research*, 39(1), 1 LP–1 16. Available at: <http://hr.iwaponline.com/content/39/1/1.abstract>
- Kienzler, P. M. (2007). Experimental study of subsurface stormflow formation. PhD Thesis at ETH Zurich. <https://doi.org/10.1093/ntr/nts067>
- Kienzler, P. M., & Naef, F. (2008). Temporal variability of subsurface stormflow formation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(1), 257–265. <https://doi.org/10.5194/hess-12-257-2008>
- Kohl, B., Klebinder, K., Sotier, B., Markart, G., & Meissl, G. (2016). Profilsprache, Kartierung, Regensimulation Erkennen, Abbilden und Validieren der räumlichen Heterogenität von Abflussprozessen. In *Forum Für Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung*, 36, 169–119.
- Kohl, B., & Stepanek, L. (2005). ZEMOKOST - neues Programm für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen. *BFW-Praxisinformation*, 8(2005), 21–22.
- Lehning, M., Völksch, I., Gustafsson, D., Nguyen, T. A., Stähli, M., & Zappa, M. (2006). ALPINE3D: A detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology. *Hydrological Processes*, 20(10), 2111–2128. <https://doi.org/10.1002/hyp.6204>
- Liechti, K., Panziera, L., Germann, U., & Zappa, M. (2013). The potential of radar-based ensemble forecasts for flash-flood early warning in the southern Swiss Alps. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(10), 3853–3869. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3853-2013>

- Margreth, M., Naef, F., & Scherrer, S. (2010). Weiterentwicklung der Abflussprozesskarte Zürich in den Waldgebieten. Report commissioned by the Canton of Zurich. Zurich.
- Markart, G., Kohl, B., Sotier, B., Schauer, T., Bunza, G., & Stern, R. (2004). Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). Vienna.
- McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Vaché, K., Dunn, S., Grant, G., Haggerty, R., et al. (2007). Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology. *Water Resources Research*, 43(7). <https://doi.org/10.1029/2006WR005467>
- Moradkhani, H., Sorooshian, S., Gupta, H. V., & Houser, P. R. (2005). Dual state-parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter. *Advances in Water Resources*, 28(2), 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.09.002>
- Müller, C., Hellebrand, H., Seeger, M., & Schobel, S. (2009). Identification and regionalization of dominant runoff processes—A GIS-based and a statistical approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6), 779–792. <https://doi.org/10.5194/hess-13-779-2009>
- Naef, F., Scherrer, S., Thoma, C., Weiler, W., & Fackel, P. (2000). Die Beurteilung von Einzugsgebieten und ihren Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung – aufgezeigt an drei Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz. Report Nr. B003 at Institute of Environmental Engineering. ETH Zurich. Zurich.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Nijzink, R. C., Samaniego, L., Mai, J., Kumar, R., Thober, S., Zink, M., ... Hrachowitz, M. (2016). The importance of topography-controlled sub-grid process heterogeneity and semi-quantitative prior constraints in distributed hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(3), 1151–1176. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1151-2016>
- Parajka, J., Naeimi, V., Blöschl, G., Wagner, W., Merz, R., & Scipal, K. (2005). Assimilating scatterometer soil moisture data into conceptual hydrologic models at the regional scale. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2, 2739–2786. <https://doi.org/10.5194/hessd-2-2739-2005>
- Pavoni, N., Jäckli, H., & Schindler, C. (1992). Geological Atlas of Switzerland, 1:25'000, sheet 1091. Zurich.
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., & Waterloo, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3469–3481. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018>
- Reszler, C., Komma, J., Blöschl, G., & Gutknecht, D. (2006). Ein Ansatz zur Identifikation flächendetaillierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50(5), 220–232.
- Rogger, M., Pirkel, H., Viglione, A., Komma, J., Kohl, B., Kirnbauer, R., ... Blöschl, G. (2012). Step changes in the flood frequency curve: Process controls. *Water Resources Research*, 48(5), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2011WR011187>
- Rosin, K. (2010). *Development, evaluation, and application of dominant runoff generation processes in hydrological modeling* University of British Columbia. Available at: <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
- Savenije, H. H. G. (2010). HESS opinions 'topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo)'. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(12), 2681–2692. <https://doi.org/10.5194/hess-14-2681-2010>
- Scherrer, S. (1997). Abflussbildung bei Starkniederschlägen - Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. PhD Thesis at ETH Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-001735502>
- Scherrer, A. G. (2006). Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Report 18/2006 commissioned by LUWG. Mainz.
- Scherrer, S., & Naef, F. (2003). A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. *Hydrological Processes*, 17(2), 391–401. <https://doi.org/10.1002/hyp.1131>
- Scherrer, S., Naef, F., Faeh, A. O., & Cordery, I. (2007). Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(2), 907–922. <https://doi.org/10.5194/hess-11-907-2007>
- Schindewolf, M., & Schmidt, W. (2009). Prüfung und Validierung des neu entwickelten Oberflächenabflussmoduls des Modells EROSION 3D im Zusammenhang mit Maßnahmen des vorsorgenden Hochwasserschutzes auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Freistaat Sachsen.
- Schmocker-Fackel, P. (2004). A method to delineate runoff processes in a catchment and its implications for runoff simulation. Zürich (15638): 187. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004836815>
- Schmocker-Fackel, P., Naef, F., & Scherrer, S. (2007). Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(2), 891–906. <https://doi.org/10.5194/hess-11-891-2007>
- Schulla, J. (1997). Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-001763261>
- Schwarze, R., Dröge, W., & Opherden, K. 1999. Regional analysis and modelling of groundwater runoff components from catchments in hard rock areas. IAHS Publ. no. 254: 221–232.
- Seibert, S. P., Ehret, U., & Zehe, E. (2016). Disentangling timing and amplitude errors in streamflow simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9), 3745–3763. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3745-2016>
- Seibert, J., & McDonnell, J. J. (2002). On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: use of soft data for multicriteria model calibration. *Water Resources Research*, 38(11): 23, 1–14. <https://doi.org/10.1029/2001WR000978>
- Semenova, O., & Beven, K. (2015). Barriers to progress in distributed hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 29(8), 2074–2078. <https://doi.org/10.1002/hyp.10434>
- Sideris, I. V., Gabella, M., Erdin, R., & Germann, U. (2014). Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(680), 1097–1111. <https://doi.org/10.1002/qj.2188>
- Smootenburg, M. (2015). Flood behavior in alpine catchments examined and predicted from dominant runoff processes. Diss. ETH No. 23010. ETHZ. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010553048>
- Stähli, M., Badoux, A., Ludwig, A., Steiner, K., Zappa, M., & Hegg, C. (2011). One century of hydrological monitoring in two small catchments with different forest coverage. *Environmental Monitoring and Assessment*, 174(1), 91–106. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1757-0>
- Steinbrich, A., Leistert, H., & Weiler, M. (2016). Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. *Environmental Earth Sciences*, 75(21), 1423. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6234-9>
- Steinrücken, U., & Behrens, T. (2010). Bodenhydrologische Karte. Mainz.
- Steinrücken, U., Behrens, T., & Scholten, T. (2006). Nutzungsbezogene Boden- hydrologische Karte: das Einzugsgebiet der Nahe und südlich angrenzende Bereiche (Soilution GbR).
- Tetzlaff, D., Soulsby, C., Waldron, S., Malcolm, I. A., Bacon, P. J., Dunn, S. M., ... Youngson, A. F. (2007). Conceptualization of runoff processes using a geographical information system and tracers in a nested mesoscale catchment. *Hydrological Processes*, 21(10), 1289–1307. <https://doi.org/10.1002/hyp.6309>
- Tilch, N., Uhlenbrook, S., & Leibundgut, C. (2002). Regionalisierungsverfahren zur Ausweisung von Hydrotopen in von periglazialen Hangschutt geprägten Gebieten. *Grundwasser*, 7(4), 206–216. <https://doi.org/10.1007/s007670200032>

- Uhlenbrook, S., Roser, S., & Tilch, N. (2004). Hydrological process representation at the meso-scale: The potential of a distributed, conceptual catchment model. *Journal of Hydrology*, 291(3–4), 278–296. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.038>
- VAW. (1994). Die Grösse extremer Hochwasser der Saltina: Hydrologische Untersuchungen nach der Hochwasserkatastrophe in Brig vom 24.9.1993. Im Auftrag des Krisenstabes Brig-Glis. Zurich.
- Vinogradov, Y. B., Semenova, O. M., & Vinogradova, T. A. (2011). An approach to the scaling problem in hydrological modelling: The deterministic modelling hydrological system. *Hydrological Processes*, 25(7), 1055–1073. <https://doi.org/10.1002/hyp.7901>
- Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J., & Weingartner, R. (2009). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland—Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. *Journal of Hydrology*, 377(1), 208–225. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.022>
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., & Weingartner, R. (2009). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling and Software*, 24(10), 1209–1222. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.04.001>
- Westerberg, I. K., Guerrero, J.-L., Younger, P. M., Beven, K. J., Seibert, J., Halldin, S., ... Xu, C.-Y. (2011). Calibration of hydrological models using flow-duration curves. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(7), 2205–2227. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2205-2011>
- Zappa, M., Bernhard, L., Spirig, C., Pfandler, M., Stahl, K., Kruse, S., ... Stähli, M. (2014). A prototype platform for water resources monitoring and early recognition of critical droughts in Switzerland. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 364, 492–498. <https://doi.org/10.5194/piahs-364-492-2014>
- Zappa, M., & Gurtz, J. (2003). Simulation of soil moisture and evapotranspiration in a soil profile during the 1999 MAP-Riviera campaign. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(6), 903–919. <https://doi.org/10.5194/hess-7-903-2003>
- Zappa, M., Jaun, S., Germann, U., Walser, A., & Fundel, F. (2011). Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains. *Atmospheric Research*, 100(2–3), 246–262. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.12.005>

SUPPORTING INFORMATION

Additional Supporting Information may be found online in the supporting information tab for this article.

How to cite this article: Antonetti M, Scherrer S, Kienzler PM, Margreth M, Zappa M. Process-based hydrological modelling: The potential of a bottom-up approach for runoff predictions in ungauged catchments. *Hydrological Processes*. 2017;31:2902–2920. <https://doi.org/10.1002/hyp.11232>

ANHANG L:

Automatisierte Abflussprozesskarte Emme (Emmenmatt), Sperbelgraben und Rappengraben

1 Beschreibung der Untersuchungsgebiete

Als Untersuchungsgebiet für die Erstellung einer automatisierten Abflusstypenkarte wurde das Einzugsgebiet der Emme (bis Emmenmatt) ausgewählt (vgl. Abb. 1). Sie entwässert ein Einzugsgebiet von 443 km². Davon sind 4% Siedlungs-, 52% Gras- und 44% Waldflächen. Es eignet sich speziell für die durchgeführten Untersuchungen, weil es ein verschachteltes Einzugsgebiet ist. Die Teileinzugsgebiete Trueb (Truebschachen, 55 km²), Ilfis (Langnau, 188 km²), Emme (Eggiwil, 124 km²), Emme (Teilgebiet Eggiwil bis Emmenmatt, 124 km²) mit Abflusspegeln sind ebenfalls mit Abflusspegeln ausgestattet (vgl. Abb. 17). Zusätzlich wurden auch der Sperbel- und der Rappengraben in die Untersuchungen miteinbezogen.

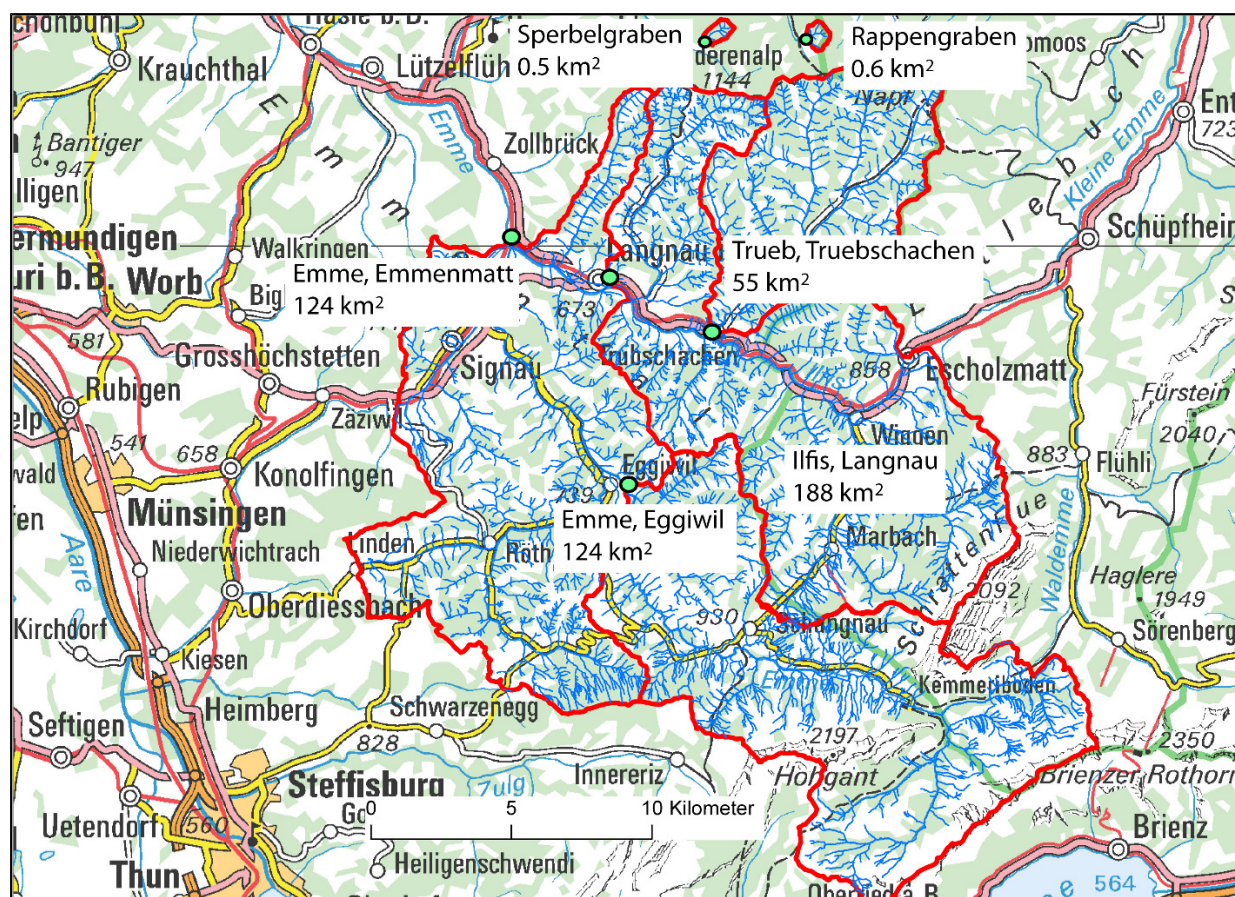


Abb. 1: Untersuchungsgebiete: Emme (bis Emmenmatt) mit Teil-EZG, Sperbel und Rappengraben.

Geologie und Landschaft

Die geologische Zusammensetzung des EZG wird grundsätzlich von vier verschiedenen tektonischen Einheiten bestimmt (Steiner, 2007; Abbildung 2). Die helvetische Randkette der Wildhorndecke bildet einen markanten Übergang vom höheren Mittelland ins Voralpengebiet. In diesem Gebiet wechseln sich Steiflanken aus harten Kieselkalk- und Schrätkalkschichten und flache Bänder aus Mergelschichten ab; Die ultrahelvetische Flyschzone, welche aus weicheren Gesteinen (schiefrige Mergel und Sandsteine) besteht; Die subalpiner Molasse, die ausgeprägte Hügelzüge ausbildet (z.B. Marbachegg); Die mittelländische Molasse, die hauptsächlich aus Mergel, Sandstein und Nagelfluh besteht. Die Obere Süßwassermolasse (OSM), die vor allem die nördlichen Teile der Ilfis und der Trueb und einen kleinen Bereich im Zwischengebiet zwischen Eggwil und Emmenmatt einnimmt (vgl. Abb. 18), besteht vor allem aus Wechsellagerungen zwischen Nagelfluh, Mergeln und Sandsteinen. Die darunterliegende Obere Meeresmolasse (OMM) ist zu einem grossen Teil aus mächtigen Sandsteinen aufgebaut. Sie erstrecken sich vor allem über den mittleren Bereich des Ilfis- und über den unteren Teil des Emme-Einzugsgebietes bis Eggwil. Im Zwischengebiet zwischen Eggwil und Emmenmatt ist die OMM vielerorts durch Moränen bedeckt. Im südöstlichen oberen Bereich des Untersuchungsgebietes (hintere Bereiche der Ilfis und der Emme bis Eggwil) folgen die Untere Süßwassermolasse (USM) und die Subalpine Molasse.

Die Bildung des Emmentaler Talbodens wurde durch verschiedene Eiszeiten des Quartärs geprägt. Durch vorrückende Gletscher lagerten sich Moränen und Schotter ab, welche später durch die Emme wieder erodiert wurden. So wurden die noch heute sichtbaren Terrassen, Kuppen und Schachen gebildet. Im Gegensatz zum restlichen Emmental blieb das Napfgebiet in der letzten grössten Eiszeit teilweise eisfrei und war der fluvialen Erosion ausgesetzt (Steiner, 2007).

Das Untersuchungsgebiet liegt im Voralpengebiet des Kantons Bern. Der untere Teil des EZGs wird hauptsächlich geprägt durch das Molassehügelland. Das benachbarte EZG der Kleinen Emme, das nicht Teil des Untersuchungsgebietes in diesem Projekt ist, weist einen ähnlichen geologischen Aufbau auf wie die Ilfis und die Emme. So zeigt sich auch in der Kleinen Emme die geologische Abfolge OSM - OMM - USM - Flysche - Kalke.

2 Automatisierte Prozesskartierung

In kleineren Projekten werden Abflussprozesskarten basierend auf dem Regelwerk von Scherrer & Naef (2003), unterstützt durch zahlreiche Aufnahmen und Beobachtungen im Feld, manuell am GIS kartiert. Für grössere Einzugsgebiete lohnt sich die Verwendung eines automatisierten Verfahrens. Die im Einzugsgebiet der Emme verwendete Methode basiert auf Ergebnissen einer Forschungsarbeit, die in zwei kleinen Einzugsgebieten im Kanton Zürich durchgeführt wurde (Schmocker-Fackel et al., 2007). Sie wurde schon für den gesamten Kanton Zürich (1830 km², Margreth et al., 2010), für die Töss (Scherrer AG, 2010), für die Kleine Emme (460 km², Scherrer & SoilCom, 2010) und für die Ilfis (188 km², Scherrer & SoilCom, 2012) angewendet und hat sich als wichtiger Input für die Berechnung von Hochwasserabflüssen bewährt.

Der Umstand, dass für das benachbarte Einzugsgebiet der Kleinen Emme und für die Ilfis, die Teil des Untersuchungsgebietes ist, schon eine Abflussprozesskarte besteht, war ein wichtiges zusätzliches Kriterium für die Wahl der Emme als Untersuchungsgebiet. In grossen Teilgebieten weisen die Kleine Emme und die Ilfis zum Einzugsgebiet der Emme landschaftliche und geologische Ähnlichkeiten auf. Der Aufwand für die Anpassungen des Regelwerkes im automatisierten Verfahren konnte dadurch reduziert werden. Im Folgenden werden Methode und Vorgehensweise zur automatisierten Erstellung der Abflussprozesskarte beschrieben.

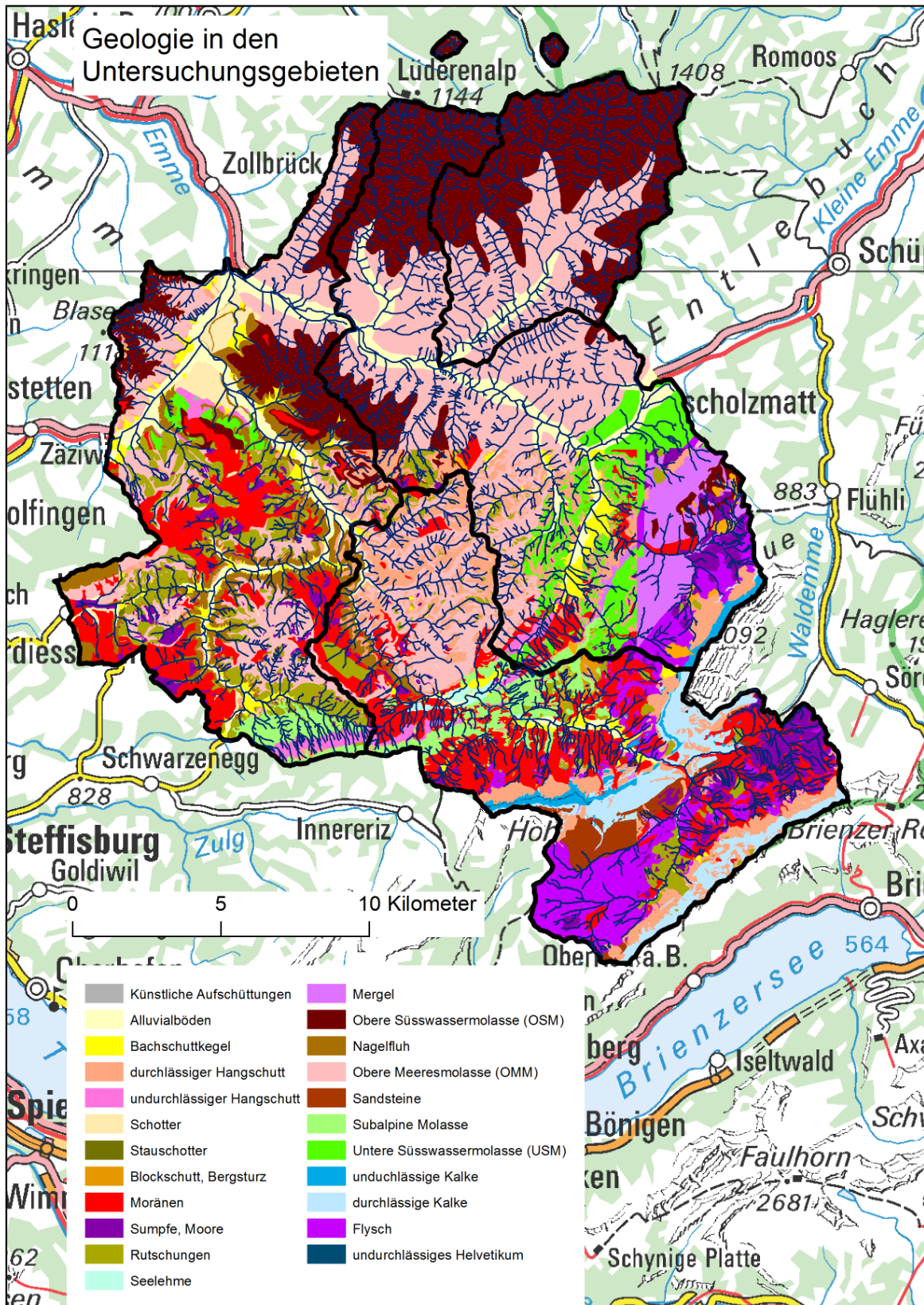


Abb. 2: Geologie in den Untersuchungsgebieten (Emme bis Emmenmatt, Sperbel- und Rappengraben).

Für die Herleitung der Dominanten Abflussprozesse wurde das Regelwerk verwendet, das im Kanton Zürich entwickelt und angewendet wurde (vgl. Abb. 19, Schmocker- Fackel et al., 2007; Naef et al., 2007). Wegen der fehlenden detaillierten Bodenkarten im Einzugsgebiet der Emme (bis Emmenmatt) musste das Regelwerk angepasst werden. So gibt es beispielsweise zur Matrixdurchlässigkeit (3) oder Drainagen (5) keine Angaben. Durch den Einbau zusätzlicher Abfragen vor allem zur Geländeneigung und zu den Geländeformen ist das angepasste Regelwerk ausführlicher und komplizierter. Die Grundstruktur, wie sie in Abbildung 18 dargestellt ist, bleibt sich jedoch gleich, weshalb sich anhand dieser Abbildung die Funktionsweise am besten erklären lässt.

Zunächst werden im Regelwerk die Speicherkapazität eines Bodens und danach der dominante Abflussprozess hergeleitet. Die Speicherkapazität wird anhand des Bodenwasserhaushaltscodes (auch Bodenwasserhaushaltsgruppen genannt), des Untertyps, der Durchlässigkeit des geologischen Untergrundes und der Matrixdurchlässigkeit des Bodens bestimmt (vgl. Abb. 18, blauer Hintergrund). Der dominante Abflussprozess (SOF, SSF, D) wird danach anhand von Drainageplänen und den SSF-Kriterien hergeleitet (vgl. Abb. 19, roter Hintergrund). Es werden 3 Speicherklassen und Gebiete ohne oder mit sehr verzögertem Abfluss (DP) bestimmt. DP kommt auf den Flächen vor, wo die Speicherkapazität des Bodens genügend gross ist, um auch extreme Niederschlagsmengen aufzunehmen (1) bzw. wo das Wasser ins darunter liegende Gestein infiltrieren kann (2). Die Vernässung eines Bodens ist ein Hinweis dafür, dass kein DP stattfindet, da entweder der Boden oder das darunter liegende Gestein stauend wirkt (3). Dort, wo das Gestein undurchlässig ist, hängt die Abflussbildung von der Speicherkapazität des Bodens und damit vor allem von den Bodenwasserhaushaltsgruppen ab. Die Bodenwasserhaushaltsgruppen stellen eine Kombination aus der pflanzennutzbaren Gründigkeit und dem Vernässungsgrad und der Vernässungsart des Bodens dar (vgl. Brunner et al., 1997 oder Margreth & Naef, 2006, S. 10). Ein trockener Boden (Bodenwasserhaushaltscode = a, d, e oder Bodenwasserhaushaltscode = b, c bei trockenem Unterboden) ist ein Hinweis dafür, dass der Boden schnell drainiert. Ob dieses Wasser nun ins Gestein versickern kann, hängt besonders von der Durchlässigkeit der obersten Gesteinsschichten ab. Zwar können den verschiedenen Gesteinsformationen keine exakten Durchlässigkeiten zugeordnet werden, weil die geologische Karte die Formationen zu wenig detailliert wiedergibt und die Durchlässigkeit auch innerhalb einer geologischen Formation variieren kann (z.B. Klüfte oder örtliche Verwitterung). Doch lässt sich anhand von Erfahrungswerten festlegen, welche Gesteine durchlässig und welche undurchlässig sind.

Vernässungsmerkmale im Boden (Bodenwasserhaushaltscode f – z oder b, c mit leicht vernässtem Unterboden) weisen darauf hin, dass entweder im Boden oder im darunter liegenden Gestein eine stauende Schicht auftritt und deshalb keine relevante Tiefenversickerung stattfinden kann. In diesen Böden hängt die Abflussbereitschaft von der Speicherkapazität des Bodens über der stauenden Schicht bzw. über dem permanenten Wasserspiegel ab. Je geringer die Speicherkapazität eines Bodens ist, desto rascher entsteht Abfluss.

Sind die Speicherkapazitäten der einzelnen Gebiete bestimmt, so wird diesen noch der Prozess zugeordnet (vgl. Abb. 19, roter Hintergrund). Angaben zu Drainageröhren sind im Einzugsgebiet der Emme nicht verfügbar, weshalb die Abfrage (5) im angepassten Regelwerk nicht vorkommt. Auch eine natürliche unterirdische laterale Entwässerung des Bodens ist möglich (SSF) (6). Sie erfolgt über laterale Fliesswege. Zur direkten Bestimmung der SSF- Gebiete fehlen in den Karten wichtige Informationen, wie die Anzahl lateraler Fliesswege oder Makroporen. Einen indirekten Hinweis liefert der Vernässungsgrad des Bodens. Ist der Boden öfters bis zur Oberfläche mit Wasser gesättigt, wird er offensichtlich nicht genügend rasch entwässert. Voraussetzung für eine unterirdische laterale Entwässerung des Bodens ist auch eine Hangneigung von > 10%, die aus dem digitalen Höhenmodell hergeleitet wird (6).

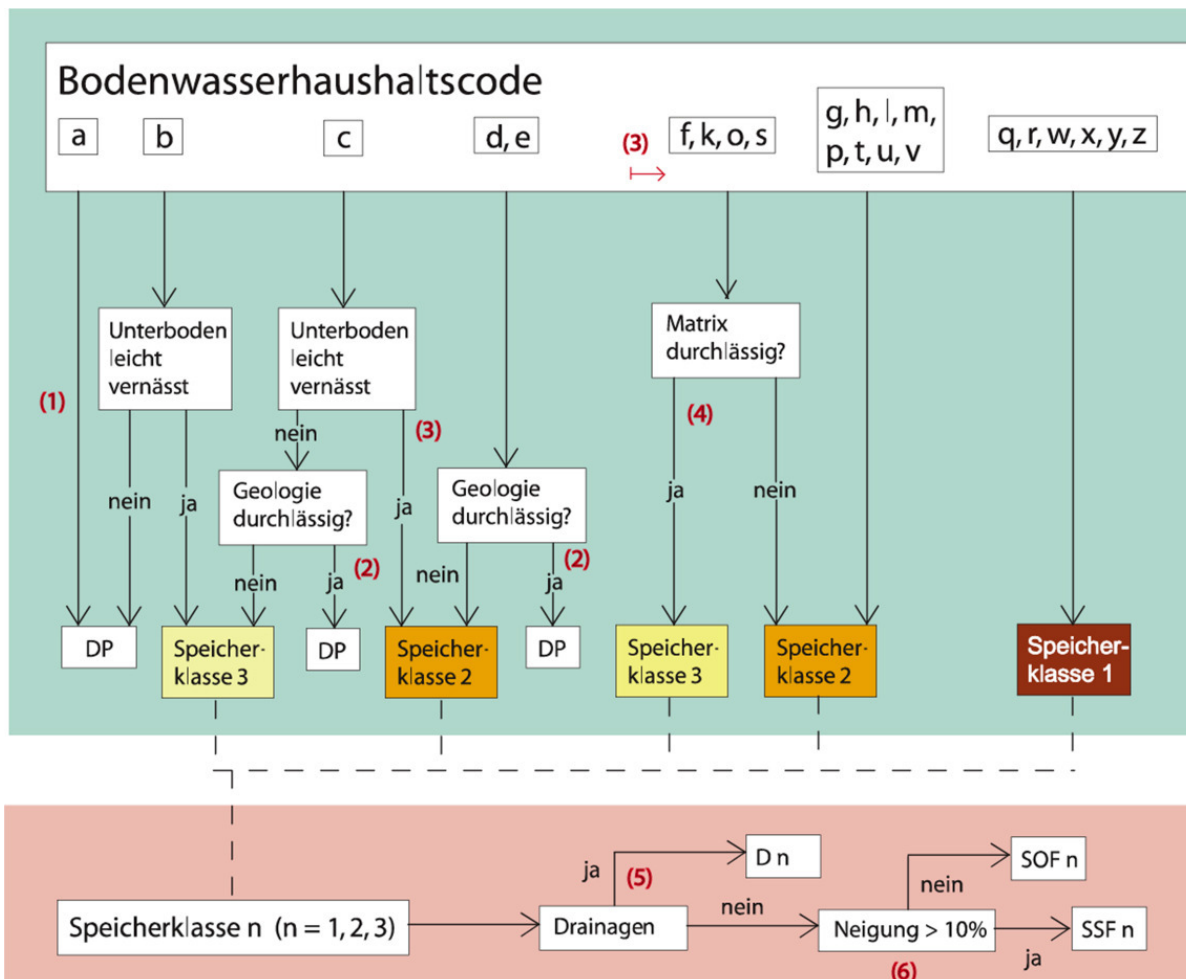


Abb. 3: Regelwerk zur automatisierten Herleitung von Dominanten Abflussprozessen.

2.2 Herleitung der Bodenwasserhaushaltsgruppen (BWHG)

Um Karten dominanter Abflussprozesse automatisch herzuleiten, sind hoch aufgelöste Informationen zur Bodeninfiltrations- und Bodenspeicherkapazität notwendig (vgl. Abb. 19). Wie in den Einzugsgebieten der Kleinen Emme und der Ilfis sind auch im Einzugsgebiet der Emme keine detaillierten Bodenkarten vorhanden. Für das noch zu kartierende Gebiet Emme (Eggiwil) und das Zwischeneinzugsgebiet zwischen Eggwil und Emmenmatt wurde deshalb eine synthetische Bodenkarte automatisch erstellt. Hierzu wurde ein Bodenprognosemodell verwendet, das am Institut für Umweltingenieurwissenschaften der ETH Zürich für die Waldgebiete des Kantons Zürich entwickelt (Margreth et al., 2010) und dann für die Anwendung in den Einzugsgebieten der Kleinen Emme und der Ilfis erweitert wurde.

Die Bodenbildung wird beeinflusst durch Faktoren wie Geologie, Relief, Klima, Vegetation und Mensch. Bodenprognosemodelle nutzen die Zusammenhänge zwischen diesen Faktoren und der an einem Standort ausgebildeten Bodenform (Bodentyp, Bodenart, Substrat), um anhand von verfügbaren Daten wie dem hoch aufgelösten digitalen Höhenmodell (DTM-AV), der geologischen Karte, dem digitalen Landschaftsmodell (VECTOR 25) und dem digitalen Gewässernetz einen Zielparameter wie beispielsweise die Bodenwasserhaushaltsgruppen (BWHG) zu prognostizieren. Um eine synthetische Bodenkarte erstellen zu können, ist also ein Verständnis darüber notwendig, wie stark die einzelnen bodenbildenden Faktoren wie Geologie, Relief, Klima und Vegetation die regionale und lokale Bodenbildung beeinflussen.

Zur automatisierten Erstellung von Abflussprozesskarten wurde das im Kanton Zürich entwickelte Bodenprognosemodell im Rahmen von Hochwasserstudien in den Einzugsgebieten der Kleinen Emme und der Ilfis angewendet. Das Regelwerk zur Herleitung der BWHG musste auf die lokal herrschenden Bedingungen der Bodenbildung, der Geologie und der Topographie angepasst werden. Dazu wurde die in Abbildung 20 beschriebene Vorgehensweise (Scherrer & SoilCom, 2010) entwickelt. Sie hat sich für die automatisierte Erstellung von Abflussprozesskarten in Gebieten ohne detaillierte Bodenkarten bewährt.

In 10 sogenannten Referenzgebieten in der Kleinen Emme und in der Ilfis (vgl. Abb. 21, grün umrandete Gebiete) wurden Abflussprozesskarten manuell kartiert. Dazu wurden in einem ersten Schritt alle verfügbaren Unterlagen über Geologie, Geomorphologie, Landnutzung und die Böden zusammengetragen. Fehlende Informationen über die Böden wurden durch Bodensondierungen erfasst, das Infiltrations- und Speichervermögen der Böden abgeschätzt und der jeweils massgebende Abflussprozess anhand des Bestimmungsschlüssels (Scherrer AG, 2006) bestimmt. Abflussprozesse ähnlicher Intensität wurden zu sogenannten Abflusstypen (Abflusstyp 1 - 5) zusammengefasst. Die Abflusstypenkarten und die geologische Beschreibung der Gebiete für die Kleine Emme und die Ilfis sind in den Berichten Scherrer & SoilCom (2010) und Scherrer & SoilCom (2012) beschrieben.

Gleichzeitig wurde das Bodenprognosemodell für die Testgebiete aufgesetzt und angewendet. Mit Hilfe einer ersten BWHG-Karte wurden in den Testgebieten die Abflussprozesskarten automatisiert hergeleitet. Die automatisiert erstellten BWHG und Abflusstypenkarten werden anhand der manuell erstellten Abflusstypenkarten überprüft. Abweichungen zwischen den im Feld erhobenen Bohrdaten und der BWHG-Karten und der manuell und automatisiert erhobenen Abflusstypenkarten werden systematisch identifiziert und zusammengetragen. Basierend darauf werden Anpassungen im Bodenprognosemodell vorgenommen. Aufgrund der Bohrungen werden inhaltliche und aufgrund der Abflusstypenkarten räumliche Abweichungen korrigiert. Mit dem korrigierten Bodenprognosemodell wird eine neue BWHG-Karte erstellt und danach zur Herleitung einer verbesserten Abflusstypenkarte verwendet, die dann wiederum überprüft und verbessert wird. Die sog. „Eichung“ des Bodenprognosemodells ist dann abgeschlossen, wenn die Verbesserungen nur noch Änderungen auf sehr geringen Flächenanteilen bewirken. Wesentlich ist, dass der „Eichprozess“ manuell durchgeführt wird. Dies fördert das Prozessverständnis in den einzelnen Teilgebieten und hilft, diejenigen Änderungen im Verfahren vorzunehmen, die ein gezieltes Teilproblem oder eine gewisse geologische Landschaft betreffen und die sich kausal aufgrund von Prozessüberlegungen nachvollziehen lassen. So lässt sich ein „Overfitting“ verhindern.

Nach Abschluss des Eichprozesses wurde das angepasste Verfahren auf die jeweils gesamte Einzugsgebietsfläche übertragen. Anhand einer letzten Feldkampagne wurde ein Teil des Einzugsgebietes nochmals abgefahren. Es wurden gezielt Flächen überprüft, die in einer Sichtung der Karte im Büro aufgefallen sind. Grossräumige Mängel in der Abflussprozesskarte wurden aufgrund von Anpassungen behoben, soweit dies möglich war. Die fertig erstellten Abflusstypenkarten für die Kleine Emme und die Ilfis sind in Abbildung 21 ersichtlich.

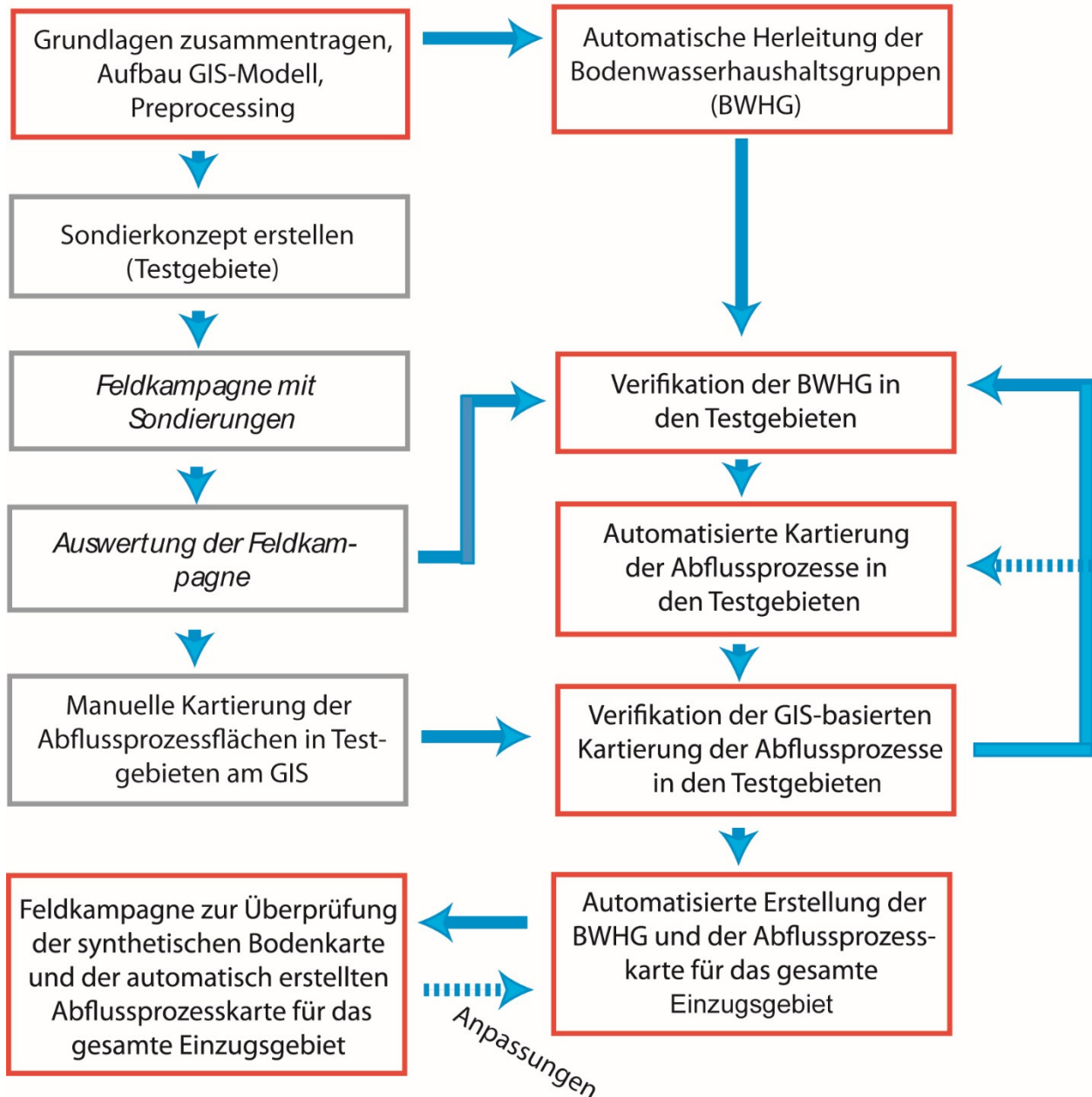


Abb. 4: Vorgehensweise bei der automatisierten Kartierung von Abflussprozesskarten.

2.4

Erstellung einer Abflussprozesskarte für die Emme (bis Emmenmatt)

Aufgrund der schon geleisteten Vorarbeiten in der Ilfis und in der Kleinen Emme wurde vor Beginn der Arbeiten beschlossen, für die Eichung des Bodenprognosemodells für die Emme (Emmenmatt) nur ein Referenzgebiet auszuwählen und falls notwendig, eine intensivere Überprüfung der gesamten Karte durchzuführen.

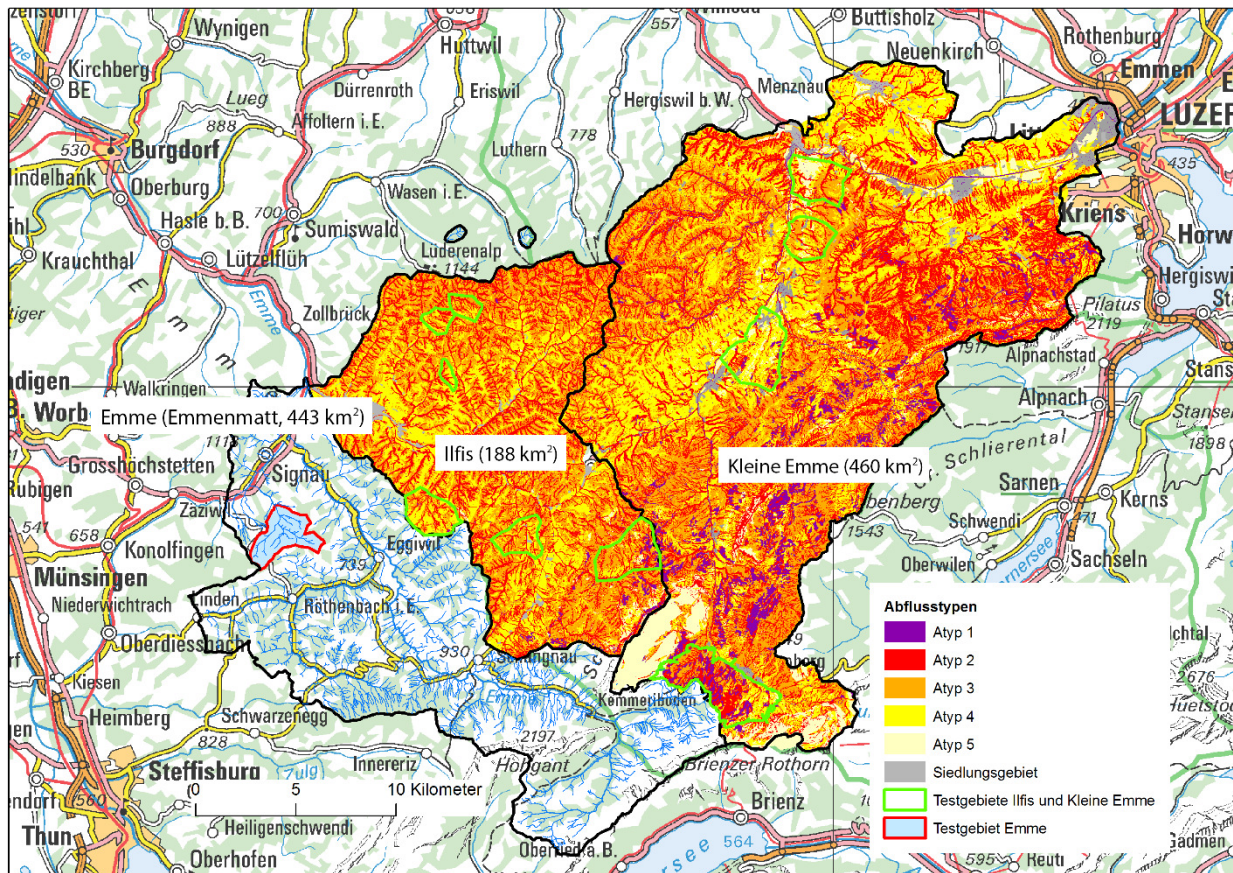


Abb. 5: Schon bestehende Abflusstypenkarten für die Kleine Emme und die Ilfis. Der noch zu kartierende Teil des Einzugsgebietes Emme (bis Emmenmatt) liegt südlich der Ilfis und ist schwarz eingrahmt. Grün eingrahmt sind die Testgebiete in der Kleinen Emme und in der Ilfis, rot das Testgebiet im noch zu kartierenden Teil der Emme.

2.4.1 Eichung des automatisierten Verfahrens im Testgebiet

Das Testgebiet wurde bewusst in einem Gebiet platziert, das viele Moränen enthält. Die Erkenntnisse aus den bisherigen Gebieten waren, dass die Vernässung und die Gründigkeiten der Böden auf Gebieten mit quartären Ablagerungen, im Speziellen auf Moränen, mit dem Bodenprognosemodell am schwierigsten einzuschätzen sind. Dies zeigte sich auch im Einzugsgebiet der Emme (vgl. Kap. 5.3.4.3). Das Testgebiet befindet sich in der OMM. Grösstensteils ist diese durch Moränen oder Rutschgebiete bedeckt (vgl. Abb. 22).

Die von Hand am GIS und mit Feldbegehungen unterstützte Kartierung der Abflusstypenkarte zeigt, dass die Abflussreaktion im Testgebiet eher verhalten ist (vgl. Abb. 23 oben). Stark beitragende Flächen kommen vor allem in den Rutschgebieten und auf der OMM entlang der Fliessgewässer vor und sind bedingt durch Bodenvernässung oder eingeschränkte Bodenmächtigkeit. Die Moränen werden in diesem Gebiet von durchlässigen und grösstenteils mächtigen Böden bedeckt. Sie reagieren deshalb eher gedämpft auf Starkniederschläge.

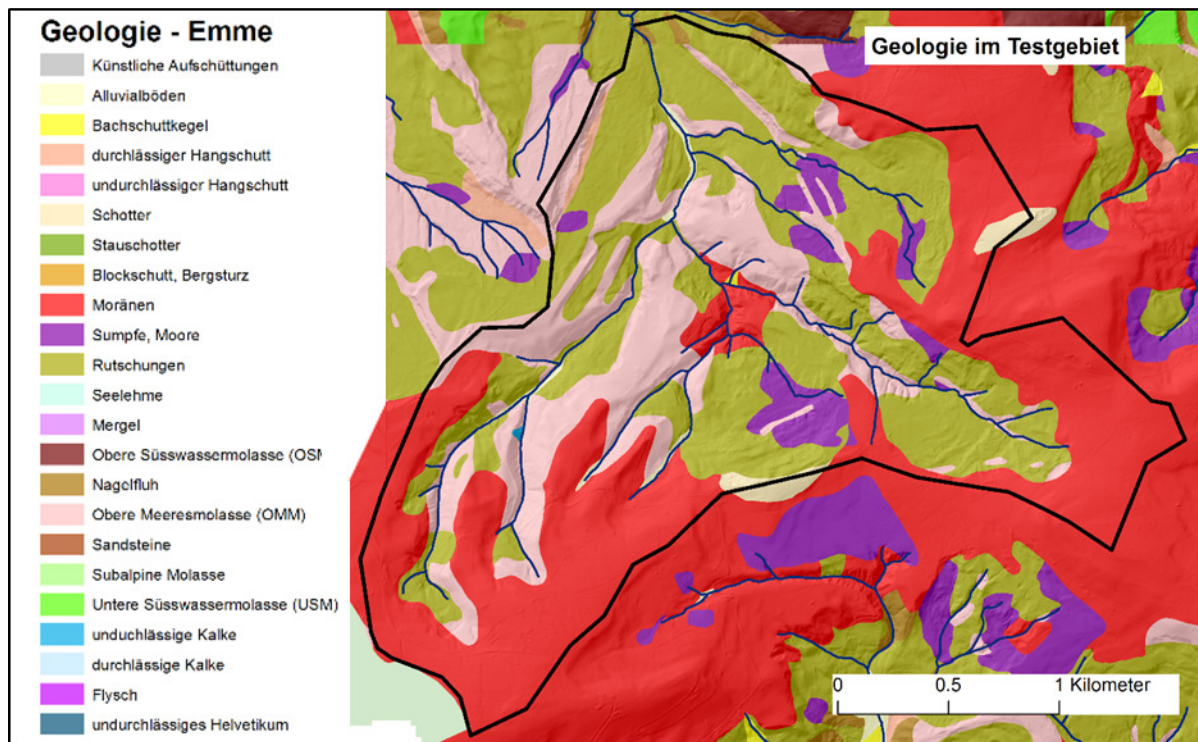


Abb. 6: Geologie im Testgebiet.

Nach vier Optimierungsdurchläufen liess sich eine maximale Übereinstimmung zwischen der automatisch hergeleiteten und der manuell kartierten Abflusstypen erzielen. Übereinstimmungen und Abweichungen in den Testgebieten wurden eingehend analysiert (vgl. Tab. 4), um die Güte des angepassten Regelwerkes beurteilen zu können. Die nach Beendigung der Eichung erstellte Abflusstypenkarte ist in Abbildung 23 unten dargestellt. In rund 58% der Flächen decken sich die Ergebnisse der beiden Methoden vollständig. Dies mag auf den ersten Blick als niedrig erscheinen. Hingegen schätzt die automatische Methode in 95% der Flächen die Abflussbereitschaft gleich oder mit einer Stufe Abweichung ein wie die manuelle. So betrachtet ist das Ergebnis gut. Damit lässt sich die Abflussbereitschaft auch von kleineren Teileinzugsgebieten zuverlässig abschätzen.

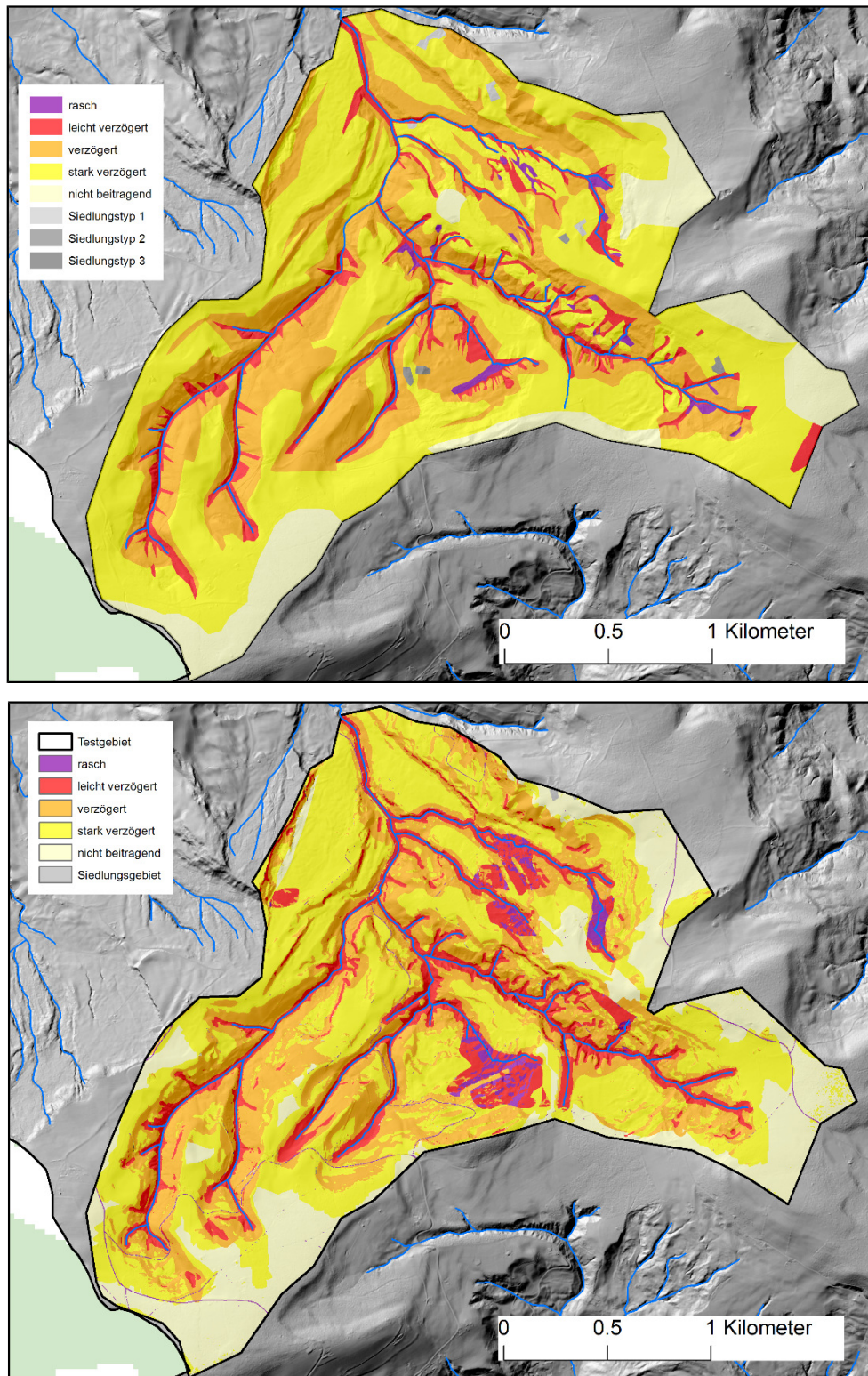


Abb. 7: Manuell kartierte (oben) und automatisierte hergeleitete Abflusstypenkarte für das Testgebiet im Einzugsgebiet der Emme (Emmenmatt).

Tab. 4: Übereinstimmungen und Abweichungen der manuell und automatisiert hergeleiteten Abflusstypen im Testgebiet.

		% der Fläche
Übereinstimmung		57.8
Automatisches Verfahren überschätzt die Abflussreaktion um:	1 Stufe	17.3
	2 Stufen	3.1
	3 Stufen	0.7
	4 Stufen	0.1
Automatisches Verfahren unterschätzt die Abflussreaktion um:	1 Stufe	19.4
	2 Stufen	1.3
	3 Stufen	0.3

2.4.2 Erstellung der Abflusstypenkarte für das Gesamt-EZG

Das Regelwerk zur Herleitung der BWHG und der Dominanten Abflussprozesse wurde nach der Verifikation anhand der manuell erstellten Abflusstypenkarten (ein Testgebiet) auf das ganze Einzugsgebiet der Emme (bis Emmenmatt) angewendet. Das Regelwerk musste auch für die Gebiete ausserhalb der Testgebiete überprüft werden. In einer weiteren Feldkampagne wurde die fürs gesamte Einzugsgebiet hergeleitete Abflusstypenkarte an 19 Standorten überprüft. Tabelle 5 zeigt das Ergebnis dieser Überprüfung. Die Standorte wurden im Büro festgelegt. Das Hauptaugenmerk wurde auf Gebiete gerichtet, die aufgrund ihrer topographischen Lage, der geologischen Gegebenheit, aber auch aufgrund unpräziser Informationen der geologischen Karten als unplausibel erscheinen. Es handelt sich also nicht um eine zufällige Auswahl, sondern eher um eine Auswahl an Standorten, wo uns die Information der Abflusstypenkarte fragwürdig erschien. Die Standorte sind in den Abbildungen H1 bis H4 im Anhang E dargestellt.

Beim Vergleich der im Feld erhobenen und automatisiert hergeleiteten Abflusstypen an den ausgewählten Untersuchungsstandorten ergibt sich folgende Bilanz:

- An 9 Standorten zeigt sich eine Übereinstimmung
- An 3 Standorten wurde die Abflussreaktion um eine Stufe überschätzt
- An 4 Standorten wurde die Abflussreaktion um eine Stufe unterschätzt.
- An 2 Standorten wurde die Abflussreaktion um zwei Stufen überschätzt
- An 1 Standort wurde die Abflussreaktion um zwei Stufen unterschätzt

Das Ergebnis ist mit demjenigen im Testgebiet vergleichbar. Es zeigt sich, dass das Regelwerk zur Herleitung der BWHG robust ist. Dies zeigen auch die Studien im Kanton Zürich (Margreth et al., 2010), in der Kleinen Emme (Scherrer & SoilCom, 2010), in der Ilfis (SoilCom, 2012) und eine spezielle Untersuchung des Bodenprognosemodells im Raum Sursee (SoilCom & UWE, 2015). Die Genauigkeit von Bodenprognosemodellen kann natürlich nicht mit der von im Feld erhobenen detaillierten Bodenkarten (Massstab 1:5'000) verglichen werden. Parzellenscharfe Bodeninformationen wie sie beispielsweise für Fragestellun-

gen im Bodenschutz oder in der landwirtschaftlichen Nutzung benötigt werden, lassen sich mit Bodenprognosemodellen nicht erstellen (SoilCom & UWE, 2015). Dazu sind Felderhebungen mit einer hohen räumlichen Bohrdichte notwendig. Für die Erstellung von Abflussprozesskarten wie sie heute verwendet werden, ist eine pro Geländeeinheit oder -kammer gemittelte Bodeninformation ausreichend. Diesen Anforderungen genügen die BWHG-Karten des verwendeten Bodenprognosemodelles (SoilCom & UWE, 2015).

Besonders anspruchsvoll war die automatisierte Herleitung der BWHG in Gebieten mit Moräne, subalpiner Molasse und Feuchtgebieten.

Moränen

Die Infiltrations- und Speicherfähigkeit der Böden auf Moränen unterscheiden sich stark. So sind Moränen im Einzugsgebiet zwischen Eggwil und Emmenmatt, wo sich auch das Testgebiet befindet, wesentlich durchlässiger als diejenigen im Einzugsgebiet der Emme bis Eggwil (vgl. Tabelle 2, Standorte 1 und 2).

Subalpine Molasse

Die Beschaffenheit der Subalpinen Molasse ist sehr unterschiedlich. Tiefgründige normal durchlässige Böden auf mächtigem Verwitterungsschutt (vgl. Tab. 2, Standort 3) treten in unmittelbarer Nachbarschaft zu vergleyten mässig tiefgründigen Böden auf (vgl. Tab. 2, Standort 4 und 5). Generell wird die Abflussbereitschaft in diesem Ausschnitt der Subalpinen Molasse eher ein wenig überschätzt. In anderen Gebieten hingegen wird die Abflussreaktion richtig wiedergegeben.

Feuchtgebiete

An einzelnen Standorten wurde die Lage, Ausdehnung und der Grad der Bodenvernässung nicht richtig eingeschätzt. So unterschätzte das Bodenprognosemodell die Bodenvernässung an den Standorten 8, 10, 11, 13, 16, wodurch dort auch die Abflussbereitschaft unterschätzt wurde.

Die obengenannten auftretenden Mängel lassen sich mit zusätzlichem Aufwand zu einem grossen Teil korrigieren, indem das Bodenprognosemodell für einzelne Gebiete verfeinert wird.

2.5 Einschätzung der Abflussreaktion der Teileinzugsgebiete

In Abbildung 24 ist die Abflusstypenkarte für das gesamte Untersuchungsgebiet dargestellt. Die Kuchen-diagramme zeigen die Zusammensetzung der Abflusstypen der einzelnen Teileinzugsgebiete. Die Reaktion des gesamten Gebietes ist vergleichbar mit der der Kleinen Emme. Am stärksten reagieren die beiden Kleinstgebiete Sperbel- und Rappengraben. Die Abflusstypen 1 und 2 nehmen rund 40%, Abflusstyp 3 über 50% der Einzugsgebietsfläche ein. Stark verzögert reagieren nur gerade 7 bzw. 6% des Einzugsgebietes. Von den Teileinzugsgebieten der Emme (Emmenmatt) weist die Trueb die stärkste Abflussreaktion auf. Die Ilfis (Langnau) und die Emme (Eggwil) zeigen eine ähnliche Zusammensetzung der Abflusstypen. Dort sind es vor allem die Flyschzonen im oberen Teil der Einzugsgebiete mit einem hohen Anteil an Abflusstypen 1 und 2, die am stärksten reagieren. In allen drei Gebieten, Trueb, Ilfis und Emme (Eggwil) dominieren steile Hänge, die für einen hohen Anteil an Abflusstypen 3 verantwortlich sind. Die Emme (Eggwil bis Emmenmatt) weist im Vergleich zu den übrigen Teilgebieten wesentlich mehr stark bis sehr stark verzögert reagierende Gebiete auf. Diese sind bedingt durch einen hohen Anteil an normal durchlässigen und tiefgründigen Böden auf den Moränen und Schottern. Grössere Ausschnitte der Abflusstypen der Teileinzugsgebiete befinden sich im Anhang E.

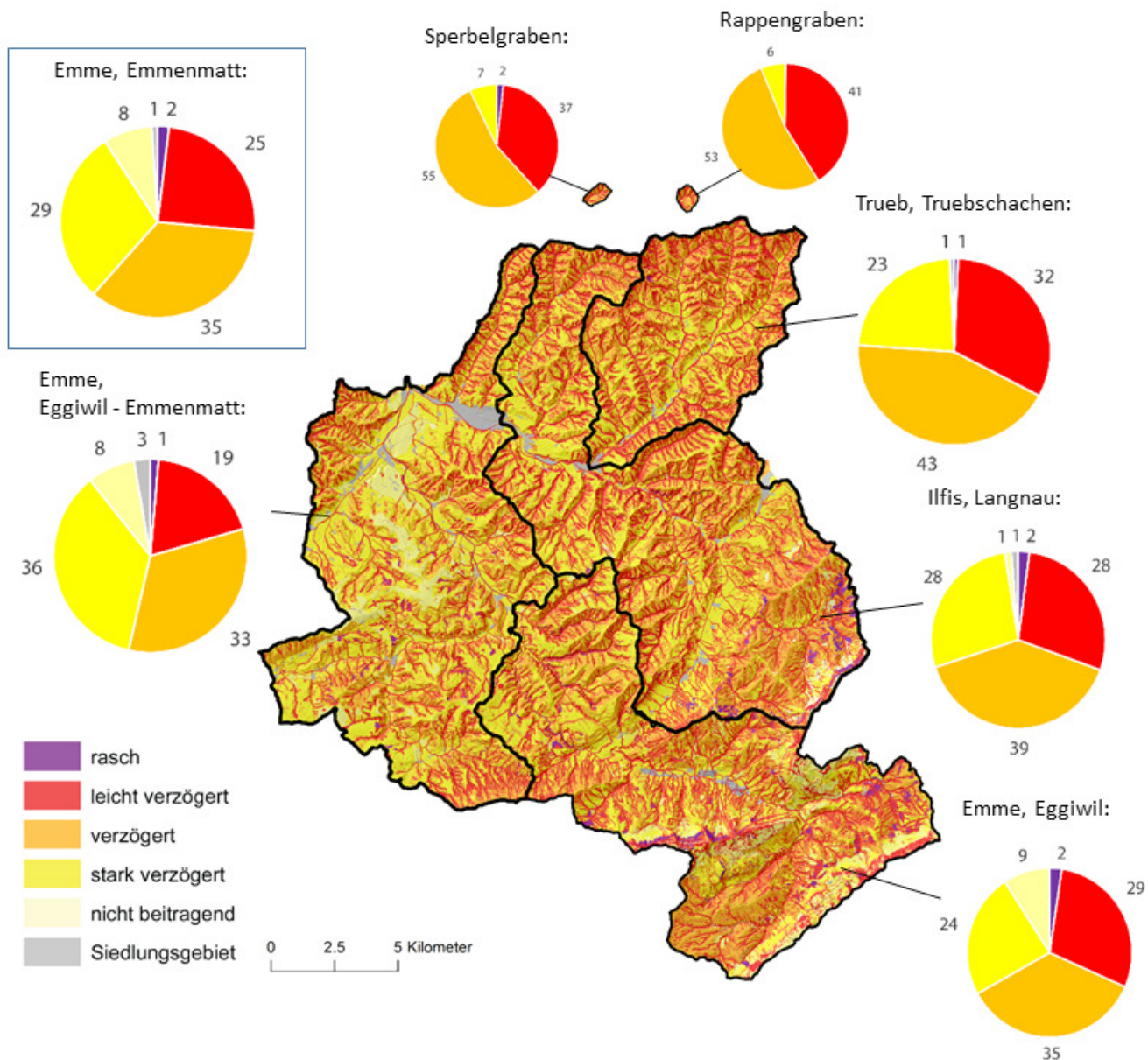


Abb. 8: Automatisiert hergeleitete Abflusstypenkarte für die Emme (bis Emmenmatt)

Tab. 5: Ergebnis der Überprüfung der Abflusstypenkarte im Feld.

Standort	Beschreibung des Bodens	Abflusstyp (beobachtet)	Abflusstyp (modelliert)	Bemerkungen	Geologie gemäss geologischer Karte
1	flachgründiger Pseudogley	2	4	Abflusstyp 4-Flächen überschätzt	Moräne
2	flachgründiger Pseudogley	2	4	Abflusstyp 4-Flächen überschätzt	Moräne
3	unvernässte tiefgründige Braunerde	4	3	teils lockere Verwitterungsschicht	Subalpine Molasse
4	vegleyte Braunerde	3	3		Subalpine Molasse
5	vegleyte Braunerde	4	3		Subalpine Molasse
6	mässig tiefgründiger Braunerdegley	3	3		verschwemmter Verwitterungsschutt, verlehnte Schuttdecken
7	mässig tiefgründige vegleyte Braunerde	3	3		verschwemmter Verwitterungsschutt, verlehnte Schuttdecken
8	flachgründiger Buntgley	2	3		verschwemmter Verwitterungsschutt, verlehnte Schuttdecken
9	mässig tiefgründige vegleyte Braunerde	3 - 4	3	teils auch Abflusstyp 3 möglich	Rutschung
10	mässig tiefgründiger Pseudogley	3	4		Rutschung
11	mässig tiefgründiger Pseudogley	3	4		Rutschung
12	normal durchlässige tiefgründige Braunerde	4	4		Moräne
13	flachgründiger Buntgley	2	3		Sumpfbereich
14	mässig tiefgründige vegleyte Braunerde	4	4		Bachschuttkegel
15	sehr tiefgründige Saure Braunerde	5	4		Moräne
16	mässig tiefgründige pseudovegleyte Braunerde	3	5		Verwitterungsboden auf risseiszeitlicher Moräne
17	tiefgründige vegleyte Kalkbraunerde	4	4		Bachschuttkegel
18	sehr tiefgründige normal durchlässige Braunerde	5	5		Schotter
19	ziemlich flachgründiger Braunerdegley	4	4	Bodenspeicher zwar gering, wegen flacher Topographie kein rascher Abfluss möglich, deshalb Atyp 4 ok.	Sumpfbereich