

Professur für Hydrologie
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Ralf Loritz

Vergleich der Abflussbildung in Baden-Württemberg in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität

Masterarbeit

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler

Korreferent: PD Dr. Jens Lange

Freiburg i. Br., August 2014

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ii
Tabellenverzeichnis	iv
Abstract	v
Zusammenfassung	vii
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung	7
3 Material und Methoden	9
3.1 Datengrundlage und Untersuchungsregion	9
3.2 Der Abflusskoeffizient	11
3.3 Automatische Ereignisselektion	12
3.4 Niederschlags-Abflussmodell RoGeR	16
3.5 Anpassen von Beta-Verteilungen	19
3.6 'Random Forest'-Regression	20
3.7 Modellgüte	23
3.8 Simulation der Abflusssensitivität mithilfe von 'Random Forest' Re- gressionen	24
4 Ergebnisse	29
4.1 Automatische Ereignisselektion	29
4.2 Abflussbildungszenarien	35
4.3 Abflussbildung	40
4.4 RF-Regression mit Zusatzparametern	45
4.5 Sensitivitätsanalyse auf Vorfeuchte und Niederschlagsintensität	46
5 Diskussion	53
5.1 Verteilung der Abflusskoeffizienten	53
5.2 Die automatischen Ereignisselektion	54
5.3 Abflussbildung in RoGeR	55
5.4 'Random Forests' mit zusätzlichen Parametern	57
5.5 'Random Forests' in der Hydrologie'	58
5.6 Abflussbildung in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität	59
6 Schlussfolgerungen	63
Literatur	65
Anhang	74

Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Skizze der automatischen Ereignisseelektion basierend auf stündlichen Niederschlagsdaten.	13
2	Schematische Skizze der erweiterten Abflussereigniselektion basierend auf der konstanten k-Methode nach BLUME et al. (2007).	14
3	Skizze der Abflussganglinienseparation	15
4	Konzeptionelle Darstellung der Abflussbildung.	17
5	Darstellung eines Entscheidungsbaumes für eine 'Random Forest' Regression (EZG = Einzugsgebiet)	22
6	Berechnung des Sensitivitätsfaktors.	26
7	Kumulative Häufigkeitsverteilungen; (A) der mittleren Abflusskoeffizienten, (B) der mittleren Ereignisdauer und (C) der Anzahl der selektierten Ereignisse der selektierten Einzugsgebiete.	29
8	Statistische Momente der Abflusskoeffizientenverteilungen der Einzugsgebiete.	30
9	Ereignisniederschlag gegen Ereignisabfluss in drei Einzugsgebieten in Baden-Württemberg	31
10	Kumulative Verteilungsfunktionen der mithilfe der automatischen Ereignisseelektion extrahierten Abflusskoeffizienten für drei Einzugsgebiete in Baden-Württemberg.	31
11	Räumliche Verteilung der mittleren Abflusskoeffizienten für die 65 ausgewählten Einzugsgebiete.	33
12	Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg mit ihrem simulierten, prozentualen Anteil des hortonischen Oberflächenabflusses (HOF) am Abfluss.	37
13	Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg mit ihrem simulierten, prozentualen Anteil des Sättigungsflächenabflusses (SOF) am Abfluss.	38
14	Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg mit ihrem simulierten, prozentualen Anteil des Zwischenabflusses (ZA) am Abfluss.	39
15	Die kumulative Häufigkeitsverteilung RMSE der Beta-Verteilung der RoGeR-Simulationen der RF-Regressionen von den Beta-Verteilungen der empirischen Abflusskoeffizienten.	40
16	Modellierte α und β Parameter der RF-Regressionen und des Modells RoGeR gegen die Parametern der empirischen Beta-Verteilung.	41
17	Exemplarisch ausgewählte kumulative Verteilungsfunktionen der empirischen (schwarz) und simulierten (rot) Abflusskoeffizienten des Giebaches (A1), der Stunzach (A2) und des Billinger Bachs,(A3).	43
18	Gegeneinander aufgetragene RMSE der RF-Regressionen und der RoGeR-Simulation von den empirischen Beta-Verteilung.	44
19	Kumulative Häufigkeitsverteilung der empirischen Abflusskoeffizienten und der simulierten Abflusskoeffizienten von RoGeR, der Einzugsgebiet in denen ZA prozentual, die dominante Abflusskomponente ist.	44

20	Abweichung der RF-Regression mit und ohne den drei neu extrahierten Einzugsgebietsparametern (kf-Parameter, Bodenfeuchteparameter) von den Beta-Verteilungen der empirischen Abflusskoeffizienten.	45
21	Die x-Achse zeigt die prozentuale Zunahme des mittleren quadratischen Fehlers (MSE_inc [%]) wenn die Position eines Parameter zufällig verändert wird. Die erklärte Varianz der beiden RF-Regressionen stehen am rechten unteren Rand der Grafik.	46
22	Abflussbildung in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität (Sensitivitätsoberflächen)	47
23	Einzugsgebiete in Baden-Württemberg und ihre Sensitivität auf die Vorfeuchte und Niederschlagsintensität bei der Abflussbildung.	50
24	Absolute Differenz zwischen den Sensitivitätsfaktoren der RF-Regression und von RoGeR.	51
25	Anteil der drei schnellen Abflusskomponenten HOF, SOF und ZA an der Abflussbildung der verschiedenen RoGeR Szenarien.	52
26	Die Pegel-Nr und die räumliche Verteilung der Einzugsgebiete die in dieser Studie verwendet werden. Pegel-Nr können in Tabelle nachgeschlagen werden.	75

Tabellenverzeichnis

1	Abgeleitete Einzugsgebietsparameter aus WABOA (2007)	11
2	Zusammenfassung aller landesweiter RoGeR Szenarien für das Bundesland Baden-Württemberg	19
3	Gewählte RoGeR Szenarien zur Berechnung des Sensitivitätsfaktors .	27
4	Spearman-Korrelationskoeffizienten* der mittleren Abflusskoeffizienten, der Schiefe und des Varianzkoeffizienten gegen die 16 Einzugsgebietsparameter	34
5	Korrelationskoeffizienten* der simulierten Abflusskomponenten basierend auf den RoGeR-Szenarien gegen die 16 Einzugsgebietsparameter	35
6	Pegel Nr. und Flussname der 65 ausgewählten Einzugsgebiete.	74
7	Pegelnummern und extrahierten Einzugsgebietsparameter aus WABOA (2007).	76

Abstract

In this study the runoff generation in dependence of antecedent soil moisture and rainfall intensity in 65 catchments in Baden-Württemberg, Germany, is analyzed. The underlying philosophy of this work is to find patterns and dependencies in the runoff formation of different catchments using various regression and scaling methods. The found patterns are used to validate the process-based runoff model RoGeR, which was developed by the Chair of Hydrology / University of Freiburg. To do so, an automatic event selection was established, which selected a total of 5250 runoff events. Based on the event selection, it was possible to determine distributions of runoff coefficients for every catchment. These runoff coefficients show strong dependencies with the climatic and topographical catchment properties and reflect the runoff characteristics of each catchment. The runoff characteristics can be represented by theoretical Beta distributions. Based on those distributions, it was possible to train 'Random-Forest' regressions on physical catchment properties and simulate the runoff formation. Furthermore, the sensitivity of the runoff generation in dependence of antecedent soil moisture and precipitation intensity was determined for each catchment by the event conditions, such as duration, antecedent soil moisture and rainfall intensity in combination with 'Random-Forest' regressions. These sensitivities confirmed the statement that the runoff formation in catchments is unique and is characterized by a non-linear threshold behavior.

To validate the model RoGeR, artificial runoff events were simulated under different antecedent soil moisture and rainfall conditions. That was done by comparing the extracted runoff characteristics and runoff sensitivities with the artificial runoff events. It could be demonstrated that RoGeR is an appropriate model to reflect the discharge in most catchments. Only in watersheds dominated by subsurface flow, runoff was frequently underestimated. Despite these facts, the runoff formation processes were simulated correctly. The conceptualizations of the runoff processes and the spatial geodata RoGeR is based on, make it possible to reproduce the runoff formation in large parts of Baden-Württemberg. However, this does not apply to catchments in which subsurface flow plays a dominant role. In order to better describe the formation of runoff in these watersheds, additional processes such as the flow of water at soil layer boundaries or information on geological formations influencing subsurface flow should be implemented.

Keywords: rainfall-runoff modeling, runoff generation, runoff coefficient, RoGeR, Random Forest, runoff generation processes, rainfall intensity, antecedent soil moisture, threshold behavior

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Abflussbildung in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität in 65 Einzugsgebieten in Baden-Württemberg analysiert und verglichen. Die zugrunde liegende Idee dieser Arbeit ist es, mit verschiedenen Regressions- und Skalierungsmethoden Muster und Abhängigkeiten in der Abflussbildung verschiedener Einzugsgebiete zu finden und damit das prozess-basiertes Abflussmodell RoGeR zu validieren. Dafür wurde eine automatische Ereignisselektion entwickelt. Mit Hilfe dieser wurden insgesamt 5250 Abflussereignisse in den 65 Einzugsgebieten selektiert und jeweils ein Abflusskoeffizient bestimmt. Für jedes Einzugsgebiet konnte eine Verteilung der Abflusskoeffizienten bestimmt und damit gezeigt werden, dass diese eine starke Abhängigkeit mit den klimatischen und topographischen Einzugsgebietseigenschaften aufweisen. Diese Verteilungen spiegeln zudem die Abflusscharakteristik in den einzelnen Einzugsgebieten wieder und können von theoretischen Beta-Verteilungen repräsentiert werden. Durch die angenäherten Beta-Verteilungen war es möglich, 'Random-Forest'-Regressionen zu trainieren und mit diesen auf Grundlage der physikalischen Einzugsgebietseigenschaften die Abflusscharakteristik wiederzugeben. Des weiteren wurde für jedes Einzugsgebiet die Sensitivität der Abflussbildung von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität mit Hilfe weiterer 'Random-Forest'-Regressionen und den Ereignisbedingungen, wie Ereignisdauer, Vorfeuchte und Niederschlagsbedingungen bestimmt. Mit diesen Sensitivitäten konnte gezeigt werden, dass die Abflussbildung in jedem Einzugsgebiet einmalig und durch nicht-lineares Grenzwertverhalten geprägt ist.

Die simulierten Abflusscharakteristiken sowie die gefundenen Abflusssensitivitäten wurden verwendet, um das Abflussmodell RoGeR zu validieren. Dazu wurden mit RoGeR simulierte Abflussereignisse unter verschiedenen Vorfeuchte- und Niederschlagsbedingungen simuliert. Es konnte gezeigt werden, dass RoGeR ein geeignetes Mittel ist, um die Abflussbildung in weiten Teilen der Untersuchungsregion wiederzugeben. In Zwischenabfluss dominierten Einzugsgebieten wurde der Abfluss jedoch flächendeckenden unterschätzt. Trotz dieser quantitativen Unterschätzung des Abflusses in einigen Zwischenabfluss dominierten Einzugsgebieten konnten nach Untersuchungen der Sensitivität der Abflussbildung gezeigt werden, dass die Abflussbildungsprozesse in Relation korrekt wiedergegeben werden konnten.

Damit machen es die konzeptionalisierten Prozesse der Abflussbildung und die flächenhaften Geodaten, auf denen RoGeR bis dato basiert, möglich einen Großteil der Abflussbildung und ihrer Prozesse in Baden-Württemberg wiederzugeben. Um auch

in Zwischenabfluss dominierten Einzugsgebieten die Abflussbildung besser beschreiben zu können, sollten im Modell RoGeR Prozesse wie das Fließen von Wasser an Horizontgrenzen im Boden oder Informationen über geologische Formationen wie Solifluktionsschuttdecken zusätzlich im Modell implementiert werden.

Keywords: Niederschlag-Abfluss Modellierung, Abflussbildung, Abflusskoeffizient, RoGeR, Random Forest, Abflussbildungsprozesse, Niederschlagsintensität, Vorfeuchte, Grenzwertverhalten

1 | Einleitung

Hydrologische Niederschlags-Abfluss Modelle werden heute in weiten Teilen der Hydrologie eingesetzt. Bei der Mehrzahl dieser Modelle wird eine Kalibrierung der Modellparameter anhand von gemessenen Abflussdaten vorausgesetzt. Diese notwendige Kalibrierung der Modellparameter macht eine hydrologische Modellierung in Einzugsgebieten in denen keine Abflussdaten vorliegen nur unzureichend möglich. Da jedoch weltweit nur ein Bruchteil aller Einzugsgebiete bemessen und intensiv untersucht sind, gelten akkurate Abflussmodellierungen in unbemessenen Einzugsgebieten als eine der großen Herausforderungen der Hydrologie (SIVAPALAN et al. 2003; VOGEL 2006; BEVEN 2011).

Um dieses Problem der Kalibrierung an Abflussdaten zu umgehen, bestehen zwei grundlegend unterschiedliche Ansätze. Beim ersten Ansatz wird versucht Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Modellparametern und physikalischen Einzugsgebietseigenschaften zu finden. Diese Zusammenhänge werden anschließend mit verschiedenen Regionalisierungsverfahren auf Grund der physikalischen Begebenheiten von bemessenen auf unbemessene Einzugsgebiete übertragen (SEIBERT 1999; WAGENER et al. 2004).

Der andere Ansatz versucht gemessene Einzugsgebietseigenschaften, wie Bodenparameter, geologische Daten oder Landnutzungskarten, direkt ins Modell als Parameter zu implementieren (BEVEN 1989; MAURER 1997). Beide Ansätze sind bis dato jedoch stark limitiert, besitzen hohe Unsicherheiten und führen meist nur zu unbefriedigenden Ergebnissen (YADAV et al., 2007). Dieses, in der Hydrologie oft diskutierte Phänomen, wird auch als Regionalisierungsproblem bezeichnet und in zahlreichen Studien thematisiert (REFSGAARD & KNUDSEN 1996; WAGENER et al. 2004; GÖTZINGER & BÁRDOSSY 2007). Dabei liegt die Problematik der Modellierung in unbemessenen Einzugsgebieten teilweise an der Einzigartigkeit von Einzugsgebieten (BEVEN, 2000) aber auch an dem Fakt, dass die gewählten hydrologischen Parameter und Modellstrukturen die Abflussbildung in Einzugsgebieten nicht korrekt wiedergeben können. Dies ist jedoch einer der Schlüsselprozesse bei der Vorhersage von Abfluss anhand von Niederschlagsdaten (BEVEN & FREER, 2001).

Wie viel und wann Niederschlag in einem Einzugsgebiet zum Abfluss gelangt wird maßgeblich von der Abflussbildung gesteuert. Sie ist das Ergebnis einer Vielzahl von komplexen Interaktionen zwischen unterschiedlichen physikalischen Phänomenen und ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilungen (WOODS & SIVAPALAN 1999; VIVONI & ENTEKHABI 2007). Eine wichtige Größe, um die Abflussbildung in Ein-

zugsgebieten zu beschreiben und zu vergleichen, ist der Abflusskoeffizient. Dieser Faktor ist ein häufig verwendeter Parameter in der Hydrologie. In dieser Arbeit spielt er sowohl bei der Beschreibung der Abflussreaktion in den unterschiedlichen Untersuchungsgebieten als auch in der Validierung des prozessorientierten Abflussmodelles RoGeR eine Schlüsselrolle (Sektion 3.4). Obwohl der Begriff des Abflusskoeffizienten ein sehr altes Konzept ist (SHERMAN, 1932), ist er immer noch Werkzeug zur Beschreibung der Abflussformation aktueller Forschungsansätze (MERZ et al., 2006). Dabei ist der Abflusskoeffizient in der Literatur nicht eindeutig abgegrenzt und wird in verschiedenen Studien in unterschiedlicher Form verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde er als prozentualer Anteil des Niederschlags definiert, der während eines Abflussereignisses direkt zum Abfluss gelangt (Ereignis-Abflusskoeffizient) (McNAMARA 1997; SIDLE et al. 2000; BOWDEN et al. 2001). Dadurch können Informationen über die Funktionsweisen verschiedener hydrologischer Landschaften erhoben werden (BLUME et al., 2007).

SCHERRER & NAEF (2007) konnten in ihren Beregnungsversuchen zeigen, dass bei gleicher Niederschlagsmenge und Intensität sehr unterschiedliche Abflusskoeffizienten von 2 % bis 90 % bestimmt werden können. Für den Fall der Abflussbildung bedeutet dies, dass die Ausgabe und die Eingabe in ein System nicht proportional sind, und damit der Prozess der Abflussbildung nichtlinear ist (PHILLIPS, 2003). Bei einer Zunahme der Niederschlagsmenge ist daraus folgend nicht mit einem äquivalenten Anstieg der Abflussmenge zu rechnen (McDONNELL 2003; ZEHE & BLÖSCHL 2004). Eine besondere Form von Nichtlinearität ist das Grenzwertverhalten, bei dem ein System schlagartig seinen Zustand ändert. Diese Grenzwerte spielen bei der Abflussbildung in vielen Einzugsgebieten eine entscheidende Rolle (ZEHE et al., 2005). Dabei sind vor allem die einzelnen Abflussbildungsprozesse häufig an Grenzwerte gebunden. Bei der Überschreitung der Infiltrationskapazität des Bodens durch zu hohe Niederschlagsintensitäten entsteht z.B. hortonischer Oberflächenabfluss (HOF). Dies kann unter anderem durch Krustenbildung, Bodenverdichtung oder durch einen hydrophoben Oberboden hervorgerufen werden. Dagegen tritt Sättigungsflächenabfluss (SOF) häufig an flachgründigen Böden oder bei hoch anstehenden Grundwasserständen auf und ist an die Überschreitung der maximalen Speicherkapazität des Bodens gekoppelt. Neben den oberflächlichen Abflussprozessen sind besonders der Zwischenabfluss (ZA) und die Tiefenperkolation (TP) als Abflussprozesse im Untergrund zu nennen. Beim ZA fließt Wasser im geeigneten Gelände in der Bodenmatrix oder durch Hohlräume und Makroporen im Boden. Dabei kann es zu schnellem ZA kommen, wenn die Bodenmatrix teilweise gesättigt ist und Wasser in gut durchlässigen Schichten oder durch Makroporen abfließt. Bei TP versickert Wasser in tiefere

Schichten des Boden oder ins Ausgangsgestein (BACHMAIR & WEILER, 2011). Dieses nichtlineare Grenzwertverhalten der Abflussbildungsprozesse wird neben den physikalischen Eigenschaften eines Einzugsgebiets maßgeblich von den komplexen Interaktionen mit den Ereignisbedingungen, wie z.B. der Vorfeuchte und der Niederschlagsintensität, gesteuert. So konnten LONGOBARDI & VILLANI (2003) zeigen, dass die Vorfeuchte in einem Einzugsgebiet stark mit dem Abflusskoeffizienten korreliert. KOSTKA & HOLKO (2002) stellten dar, dass die Abflussbildung grundlegend von der Niederschlagsintensität und der Niederschlagssumme abhängt. Dabei gilt, dass wenn schnelle Abflussprozesse in einem Einzugsgebiet dominieren, der Abflusskoeffizient hoch und die Abflussreaktion kurz ist. Dagegen ist der Abflusskoeffizient für gewöhnlich niedrig und die Abflussreaktion auf ein Niederschlagsereignis deutlich verzögert, wenn langsame Abflussprozesse vorherrschen (SCHMOCKER-FACKEL et al., 2007). Da die Abflussreaktion grundlegend auch die Hochwassergefahr in einem Einzugsgebiet steuert, ist es zielführend die relevanten Abflussprozesse unter unterschiedlichen Bedingungen zu quantifizieren, um die Reaktion eines Einzugsgebietes auf Niederschlagsereignisse vorherzusagen zu können. Aus diesem Grund wurde an der Professur für Hydrologie in Freiburg das Modell RoGeR ('Runoff-Generation-Research model') entwickelt. Mit diesem ist es möglich, flächendeckend die Abflussprozesse in Abhängigkeit verschiedener Vorfeuchte- und Niederschlagsbedingungen quantifizieren zu können. RoGeR verwendet dabei detaillierte Informationen über Vegetation, Landnutzung, Geologie, Bodeneigenschaften und präferentielle Fließwege. Das Modell wurde zur Abflussbildungsforschung entwickelt und benötigt keine Kalibrierung. Es basiert ausschließlich auf Literaturwerten und Ergebnissen aus Feldstudien (WABOA, 2007).

Als Problematisch erweist sich, dass RoGeR bisher nur beispielhaft anhand von 16 Abflussereignissen in acht ausgewählten Einzugsgebieten validiert wurde. Ob es jedoch landesweit die Abflussbildung korrekt wiedergeben kann, wurde noch nicht untersucht. So sollten, wenn bestimmte Abflussprozesse ein Einzugsgebiet dominieren, dessen Reaktionen je nach Niederschlagsintensität und Vorfeuchte unterschiedlich ausfallen. Wenn z.B. HOF ein Einzugsgebiet dominiert, sollte die Abflussbildung dort nicht sensitiv gegenüber der Bodenfeuchte sein, sondern eine hohe Abhängigkeit mit der Niederschlagsintensität aufweisen.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass bis dato kaum Studien zur Verfügung stehen, in denen die Sensitivität der Abflussbildung auf Vor- und Ereignisbedingungen in mehreren Einzugsgebieten untersucht wurde. In den Studien von LONGOBARDI & VILLANI (2003), TRAMBLAY et al. (2010) und TRAMBLAY et al. (2011) wurde der Einfluss der Vorfeuchte- und der Niederschlagsbedingung auf die Abflussbildung

jeweils nur in einem einzigen Einzugsgebiet analysiert. Auch der theoretische Ansatz von WOODS & SIVAPALAN (1999), bei dem die dominanten Strukturen bei Abflusssereignissen bestimmt werden sollen, wurde in der Praxis noch nicht umgesetzt.

Um die Abflussreaktion räumlich in Form des Abflusskoeffizienten zu untersuchen wurde von MERZ et al. (2006) eine automatische Ereignisselektion entwickelt. Mit Hilfe dieses Verfahrens konnten 50000 Abflusskoeffizienten aus 337 Einzugsgebieten in Österreich bestimmt werden. Die Methode von MERZ et al. (2006) hat jedoch einige Schwachpunkte. Einer davon ist, dass eine Basisabflussseparation vorausgesetzt wird, die manuell von einem Bearbeiter angepasst werden muss. Basisabflussseparationen, die ohne Feldmessungen durchgeführt werden, sind zu einem großen Teil subjektiv. Dabei unterliegt zum einen die Identifikation des Punktes, an dem der gesamte Abfluss aus Basisabfluss besteht und zum anderen die Bestimmung des Verlaufs des Basisabflusses während eines Ereignisses der persönlichen Einschätzung des Betrachters (CHAPMAN 1999; BLUME et al. 2007). Durch diese Subjektivität entsteht eine nicht berechenbare Unsicherheit in der Selektion der Ereignisse, die auf keinem physikalischen Prozess beruht, aber sowohl die Auswahl sowie Start- und Endpunkt eines Ereignisses bestimmen. Ein weiterer Nachteil der Methode ist, dass relativ hohe Niederschlagsereignisse, die unter Umständen nur sehr geringe Abflussreaktionen hervorrufen, durch die Selektion mittels des Abflusses nicht ausgewählt werden können. In der Studie von MERZ et al. (2006) sind diese Unsicherheiten auf Grund der Vielzahl von Einzugsgebieten (337), der sehr hohen Anzahl von ausgewählten Ereignissen (64000), sowie den langen Untersuchungszeiträumen (1981 bis 2000) gering (NORBIATO et al., 2009). So konnten basierend auf diesem Ansatz MERZ & BLÖSCHL (2009) eine Vielzahl von Abflusskoeffizienten auf die Abhängigkeiten von physikalischen Einzugsgebietseigenschaften analysieren. Die extrahierten Abflusskoeffizienten wurden jedoch ausschließlich verwendet, um die Abflussbildung räumlich zu vergleichen und nicht auf Zusammenhänge mit den Ereignisbedingungen wie Dauer, Vorfeuchte und Niederschlagsintensität hin untersucht.

Um die Simulationsergebnisse von RoGeR zu validieren, müssen aber erstens die Abflussbildung allgemein und zweitens die Abhängigkeiten der Abflussbildung auf die Vorfeuchte und Niederschlagsintensität für die einzelnen Einzugsgebiete bestimmt werden. Dies ist ein wichtiger Punkt, da RoGeR kein klassisches hydrologisches Modell wie z.B. 'TOPmodel' (Topography-based hydrological model) (BEVEN et al., 1984), dessen Hauptaufgabe die korrekte quantitative Wiedergabe der Abflussganglinie ist. RoGeR ist ein Abflussforschungsmodell, das eine Vereinfachung und schematische Darstellung des heutigen Verständnisses der Abflussbildung abbildet. Wenn dieses Modell die Abflussbildung wiedergeben kann, sind die Hypothesen und ver-

einfachen Annahmen, die im Modell getroffen wurden, korrekt und die Abflussbildung in Baden-Württemberg kann beschrieben werden. Ist es nicht in der Lage, die Abflussbildung ausreichend wiederzugeben, sind die Konzeptionalisierungen der Prozesse, sowie die zu Grunde liegenden Geodaten noch nicht ausreichend entwickelt und es muss geprüft werden, wo genau die Schwachstellen liegen und wo damit weiterer Forschungsbedarf besteht.

2 | Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die Abflussbildung in Baden-Württemberg in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität in 65 verschiedenen Einzugsgebieten zu analysieren und zu vergleichen. Dazu werden mithilfe eines neu entwickelten Verfahrens automatisch Abflussereignisse selektiert und Abflusskoeffizienten bestimmt. Die Verteilung der Abflusskoeffizienten in einem Einzugsgebiet werden auf Muster und Zusammenhänge mit den jeweiligen physikalischen Einzugsgebietseigenschaften hin untersucht, um dadurch die Abflussbildung zu beschreiben. Im Folgenden werden mit dem Modell RoGeR landesweite, verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Vorfeuchte- und Niederschlagsbedingungen simuliert. Es wird geprüft, ob RoGeR die gefundenen Muster und Abhängigkeiten der Abflussbildung in den einzelnen Einzugsgebieten wiedergeben kann.

Anschließend wird die Sensitivität der Abflussbildung auf die Vorfeuchte und die Niederschlagsintensität in jedem Einzugsgebiet bestimmt und geprüft, ob RoGeR auch diese Abhängigkeiten wiedergeben kann.

Zusammenfassend kann die Arbeit damit in drei untergeordnete Fragestellungen eingeteilt werden.

- (I) Wie können für eine Vielzahl von Einzugsgebieten automatisch Abflusskoeffizienten bestimmt werden und Muster sowie Abhängigkeiten von physikalischen Einzugsgebietseigenschaften gefunden werden?
- (II) Kann das Abflussmodell RoGeR mit den simulierten Szenarien die gefundenen Muster der Abflussbildung in den einzelnen Einzugsgebieten wiedergeben?
- (III) Ist die Vorfeuchte oder die Niederschlagsintensität die dominante Größe bei der Abflussbildung in einem Einzugsgebiet und simuliert RoGeR diese Sensitivitäten der Abflussbildung richtig?

3 | Material und Methoden

Alle Berechnungen und Analysen in dieser Studie wurden mit quelloffenen Programmen durchgeführt, die unter der *GNU Public License* veröffentlicht sind. Die gesamte Datenverarbeitung sowie die automatische Ereignisselektion wurde mittels der Programmiersprache Python und den Zusatzpaketen 'numpy' und 'pandas' umgesetzt. Für die statistischen Auswertungen, die unterschiedlichen Regressionsmodelle und die Anpassung von Verteilungen wurde die Statistiksoftware R ('R') mit den Zusatzpaketen 'RandomForest' und 'fitdistrplus' verwendet. Quantum GIS diente als Geographisches Informationssystem (GIS) und wurde hauptsächlich zur Darstellung und Visualisierung von geographischen Daten eingesetzt.

3.1 Datengrundlage und Untersuchungsregion

Diese Studie wurde im Südwesten Deutschlands im Bundesland Baden-Württemberg durchgeführt. Es wurden aus der dortigen Region 65 mesoskalige Einzugsgebiete¹ mit einer Fläche von 3,1 bis 256,8 km² ausgewählt (Abbildung 11). Die Untersuchungsgebiete wurden so ausgewählt, dass der Abfluss möglichst wenig durch antropogene Störungen wie Staudämme oder Wasserentnahmestellen beeinflusst ist.

Die Einzugsgebiete liegen auf mittleren Höhen zwischen 207 m ü. NN bis maximal 1082 m ü. NN. Die höchsten Einzugsgebiete liegen im Süd-Westen der Region im Hochschwarzwald. Diese verzeichnen auch die höchsten Niederschlagswerte mit jährlichen Niederschläge von bis zu 1595 mm. Im Vergleich dazu befinden sich eher trockene Einzugsgebiete mit jährlichen Niederschlagssummen um 570 mm im Nordosten Baden-Württembergs. Im Mittel liegen alle Einzugsgebiete auf 656 m ü. NN und haben einen jährlichen mittleren Niederschlag von 925 mm. Die durchschnittlichen Abflüsse variieren zwischen 0,017 m³/s und 4,91 m³/s, wobei die höchsten Werte wiederum für die Schwarzwaldregion gefunden werden.

Als Untersuchungszeitraum wurde der Zeitraum vom 1.2.2007 bis zum 1.2.2012 definiert, da für diese Spanne stündliche Niederschlagsdaten für die Region vorlagen. Diese Daten wurden an der Professur für Hydrologie flächeninterpoliert und basieren auf 'MeteoMedia' sowie auf Niederschlagsmessstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die verwendeten stündlichen Abflussdaten stammen von Abflusspegeln des Landesamtes für Umwelt, Messung und Naturschutz (LUBW).

¹Alle Einzugsgebiet mit Flussnamen sowie die physikalischen Einzugsgebietsparameter können im Anhang gefunden werden.

Alle räumlich aufgelösten Daten wie Landnutzungs- und Bodenkarten wurden aus der digitalen Version des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WABOA (2007)), der von der LUBW in Kooperation mit der Professur für Hydrologie erstellt wurde, entnommen. Die Basis der Landnutzungsdaten sind Landsat TM Satellitenbilder, sowie Topographische Karten im Maßstab 1:100 000. Diese wurden in Kombination mit Luftbildern dazu verwendet, die Fläche Baden-Württembergs in Landnutzungseinheiten gemäß der 'CORINE' Land Cover Nomen (Coordination of Information on the Environment) einzuteilen. Die Bodenkarten basieren auf Bodenübersichtskarten, die vom Geologischen Landesamt Baden-Württemberg (LGRP) im Maßstab 1:200 000 erstellt wurden und für den WABOA (2007) aufbereitet und digitalisiert wurden.

3.1.1 Bodenfeuchte

Die flächendeckenden Bodenfeuchtedaten stammen aus Simulationen des Grundwasserneubildungsmodells Baden-Württemberg (GWN-BW), die für die gesamte Ausdehnung Baden-Württembergs im Zeitraum von 1971 bis 2013 modelliert wurden (MORHARD, 2012). Das GWN-BW basiert auf dem Modell TRAIN, das an der ETH Zürich entwickelt und von AMBRUSTER (2002) erweitert wurde (TRAIN-GWN). Es handelt sich dabei um ein deterministisches und räumlich aufgelöstes Modell, das auf Tagesbasis die aktuelle Evapotranspiration, die Bodenfeuchte sowie die Sickerwassermenge berechnet. Es besteht sowohl aus physikalischen als auch konzeptionellen Teilmodulen. Eingangsdaten sind Tageswerte des Niederschlags, der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte, der Sonnenscheindauer sowie der Windstärke. Die Simulationsergebnisse liegen flächendeckend in etwa $0,54 \text{ km}^2$ großen Polygonflächen vor, die durch Verschneidungen von Leitbodenformen und Landnutzungsclassen erzeugt wurden (WABOA, 2007). Aus den verschiedenen Polygonflächen wurde auf Einzugsgebietsebene der Mittelwert berechnet. Daraus wurde für den Untersuchungszeitraum eine durchgängige Zeitreihe für jedes Einzugsgebiet erstellt. Der Mittelwert der Bodenfeuchte in einem Einzugsgebiet wurde gewählt, da er von ZEHE & BLÖSCHL (2004) als wichtige Kenngröße bei der Vorhersage der Abflussreaktion eingestuft wurde.

3.1.2 Bestimmung der Einzugsgebietsparameter

Basierend auf den räumlich aufgelösten Rasterdaten aus dem WABOA (2007) wurden für jedes Einzugsgebiet verschiedene Gebietsparameter abgeleitet (Tabelle 1).

Sie wurden nach dem Vorbild von NORBIATO et al. (2009) in drei Hauptgruppen eingeteilt. Die erste Hauptgruppe besteht aus den jährlichen Niederschlagswerten und topographischen Daten, die zweite aus Landnutzungsklassen und die letzte aus Bodeneigenschaftsklassen. Für alle Landnutzungs- und Bodenparameter wurde der prozentuale Anteil an der Einzugsgebietsfläche bestimmt.

Tabelle 1: Abgeleitete Einzugsgebietsparameter aus WABOA (2007)

Klimatische und topographische Parameter	Abkürzung
- Mittlerer jährlicher Niederschlag [mm]	N
- Mittlere Einzugsgebietssteigung [%]	Steigung
- Mittlere Einzugsgebietshöhe [m]	Hoehe
- Einzugsgebietsfläche [km ²]	Flaeche
Landnutzungsparameter	Abkürzung
- Bewaldeter Einzugsgebietsanteil [%]	Wald
- Verdichteter Einzugsgebietsanteil [%]	verdichtet
- Feuchtflächen im Einzugsgebiet [%]	Feuchtfl.
- Ackerfläche im Einzugsgebiet [%]	Acker
Bodenparameter	Abkürzung
- tiefgründige Böden [%]	B_tief
- mittelgründige Böden [%]	B_mittel
- flachgründige Böden [%]	B_flach
- Ton dominierte Böden [%]	B_Ton
- Lehm dominierte Böden [%]	B_Lehm
- Sand dominierte Böden [%]	S_Sand
- Karst [0/1]	Karst

3.2 Der Abflusskoeffizient

Zur Bestimmung des Abflusskoeffizienten ist eine Separation der Abflussganglinie in einzelne Abflussereignisse erforderlich. Diese separierten Ereignisse werden wiederum in den Basisabfluss (Langsame Fließkomponente) und in den Direktabfluss (Schnelle Abflusskomponente) unterteilt. Das Verhältnis vom Niederschlag, der während eines solchen Ereignisses fällt, zum Direktabfluss wird als Abflusskoeffizient bezeichnet. Der Abflusskoeffizient kann Werte zwischen null und eins annehmen. Null bedeutet, dass bei einem Niederschlagsereignis kein Wasser als Direktabfluss zum Abfluss gelangt. Ist er im Gegensatz dazu eins, gelangt aller Niederschlag direkt während des Ereignisses zum Abfluss.

3.3 Automatische Ereignisselektion

Bei der automatischen Ereignisselektion von MERZ et al. (2006) können Unsicherheiten auf Grund der Vielzahl von Einzugsgebieten (337), der sehr hohen Anzahl von ausgewählten Ereignissen (64000), sowie den langen Untersuchungszeiträumen, (1981 bis 2000) gering gehalten werden (NORBIATO et al., 2009). Dagegen ist der Untersuchungszeitraum sowie die Untersuchungsregion mit lediglich 6 Jahre und 65 Einzugsgebiete in dieser Studie begrenzt. Dafür liegen für den ausgewählten Bereich präzise Niederschlagsdaten vor und das zu validierende Modell RoGeR ist ausschließlich in den schnee- und eisfreien Monaten einsetzbar. Deswegen wurde eine neue Ereignisauswahl entwickelt, die einen Ansatz nach BLUME et al. (2007) zur Abflussganglinienseparation mit einer Ereignisauswahl auf Grundlage von Niederschlagsgrenzwerten kombiniert. Im Gegensatz zur bereits etablierten automatischen Abflussereignisselektion nach MERZ et al. (2006), bei der hier angewandten Methode die Niederschlagshöhe und -dauer das Kriterium zur Auswahl eines Abflussereignisses.

In der selbst entwickelten automatischen Ereignisselektion werden die stündlich aufgelösten Niederschlagsdaten oberhalb eines Grenzwerts von 3 mm in 'feuchte' ($N > 3 \text{ mm}$) und unterhalb in 'trockene' ($N < 3 \text{ mm}$) Werte eingeteilt. Wenn in einem Zeitabschnitt von 24 Stunden alle Niederschlagswerte als 'trocken' definiert sind, wird dieser Bereich als Ereigniszwischenraum definiert. Dieses Vorgehen führt zu einer breiten Auswahl an Abflussereignissen, bei der auch Ereignisse mit einer geringen Abflussreaktion selektiert werden, die durch eine hohe Niederschlagssumme charakterisiert sein können (Abbildung 1).

Durch visuelle Auswertungen und Bestimmung des Abflusskoeffizienten einzelner Ereignisse zeigte sich, dass eine Vielzahl dieser durch die oben beschriebene Selektion aus hydrologischer Sicht häufig zu früh endeten. Aus diesem Grund wurde die Auswahl der Ereignisse mit einer Abflussganglinienseparation von BLUME et al. (2007) ('konstantes k' Methode) kombiniert. Mit dieser Methode ist es möglich, basierend auf der Duperit-Boussinesq Gleichung (Gleichung 1), den Punkt auszuwählen, an dem der gesamte Abfluss aus Basisabfluss besteht. Bei der Duperit-Boussinesq Gleichung wird angenommen, dass der Grundwasser/Basisabflussspeicher linear ist und durch einen exponentiellen Abfluss gekennzeichnet ist.

$$Q(t) = Q(0)e^{(-kt)} \quad (1)$$

$Q(t)$ ist der Abfluss zum Zeitpunkt t und $Q(0)$ der Abfluss am Beginn der Rezession.

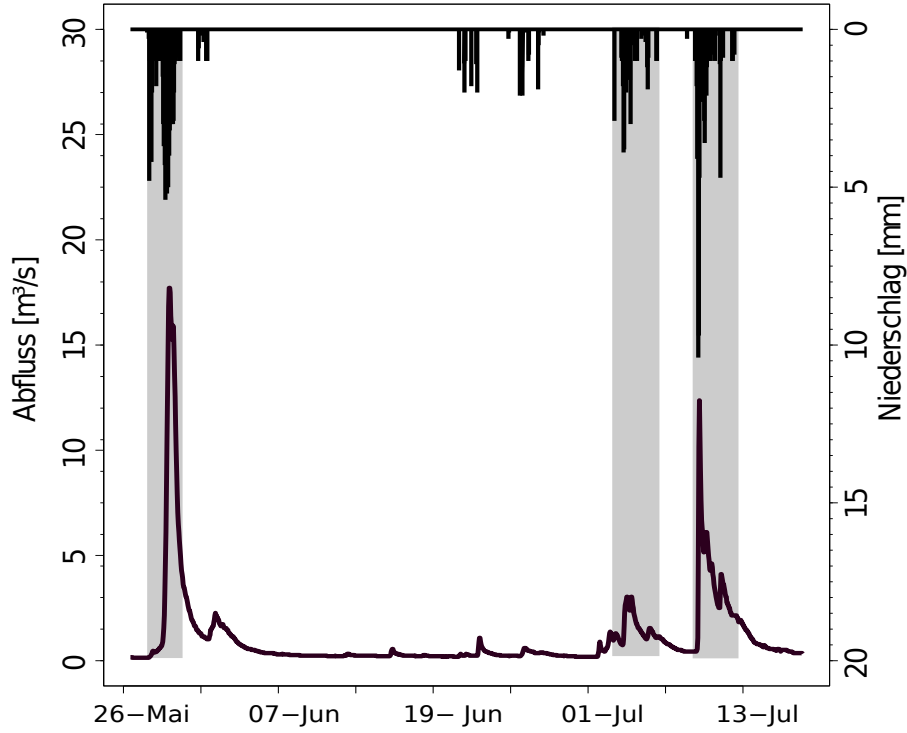


Abbildung 1: Schematische Skizze der automatischen Ereignisseelektion basierend auf stündlichen Niederschlagsdaten. Grau markierte Bereiche sind ausgewählte Abflussereignisse, bei denen ein Einzugsgebietsniederschlag über 3 mm/h gemessen wurde.

Der Parameter k ist der Rezessionskoeffizient. Unter der Annahme eines linearen Basisabflussspeichers konnte Gleichung 1 von BLUME et al. (2007) nach k linearisiert werden:

$$k = \frac{\Delta Q}{\Delta t} * \frac{1}{Q(t)} \quad (2)$$

So kann für jeden Zeitschritt eines Ereignisses nach der letzten lokalen Abflussspitze ein k -Wert berechnet und dieser mit dem vorangegangenen Werten subtrahiert werden (Δk). Wenn diese neue Variable Δk gegen Null strebt (Abbildung 2), gilt ein Abflussereignis als beendet, da davon ausgegangen werden kann, dass der Abfluss einem linearen Speicher folgt und der Abfluss aus langsameren Nicht-Ereignis Wasser besteht (Abbildung 2). Die neue Variable Δk ist sehr sensitiv gegenüber kleinen Abflussschwankungen. Deshalb ist es notwendig ein dreistündiges gleitendes Mittel aus ihr zu bilden. Zusätzlich war es im Gegensatz zur Arbeit von BLUME et al. (2007) in dieser Studie notwendig, die Endbedingung Δk von 0 auf 0.01 anzuheben. Dies liegt neben natürlichen Abflussschwankungen auch an unnatürlichen Abflussschwankungen auf Grund von fehlender Messgenauigkeit im Niedrigwasserbereich in verschiedenen, vorzugsweise kleinen Einzugsgebieten.

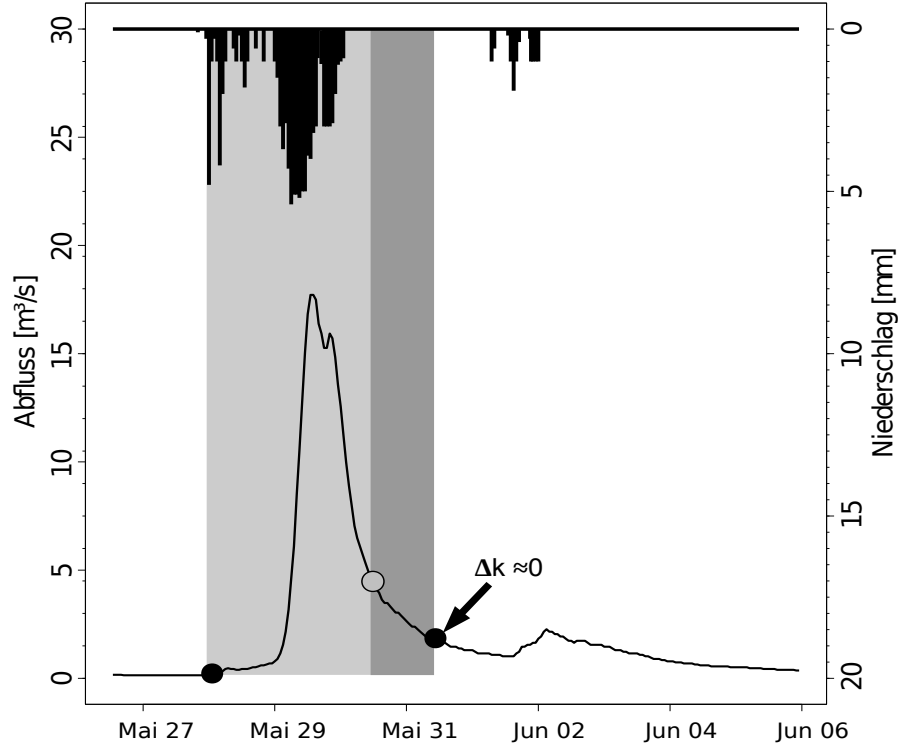


Abbildung 2: Schematische Skizze der erweiterten Abflussereignisselektion basierend auf Gleichung 2. Der hellgraue Bereich definiert die Abflussereignisauswahl über den Niederschlag, der dunkelgraue Bereich die Erweiterung mittels des Ansatzes nach BLUME et al. (2007).

Die Berechnung der Ereignis-Abflusskoeffizienten setzt die Einteilung des Abflusses in Basis- und Direktabfluss voraus. Ausgehend vom Startpunkt eines Events wird deshalb eine waagrechte Linie bis zum Endpunkt des Ereignisses gezogen. Die gesamte Fläche zwischen der gezogenen waagrechten Linie und der Abflussgangkurve wird anschließend integriert und bildet den Direktabfluss (Abbildung 3). Durch die Integration des Niederschlags im ausgewählten Ereignisbereich und der anschließenden Division durch den Direktabfluss kann so für jedes Ereignis ein Abflusskoeffizient ermittelt werden.

3.3.1 Lineares Modell

Für jedes Einzugsgebiet wurde für den Ereignisabfluss und den Niederschlag ein lineares Modell mithilfe der Minimierung der kleinsten Quadrate Methode angepasst (CHAMBERS & HASTIE, 1991),

$$\text{RSS} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (a + bx_i))^2 \quad (3)$$

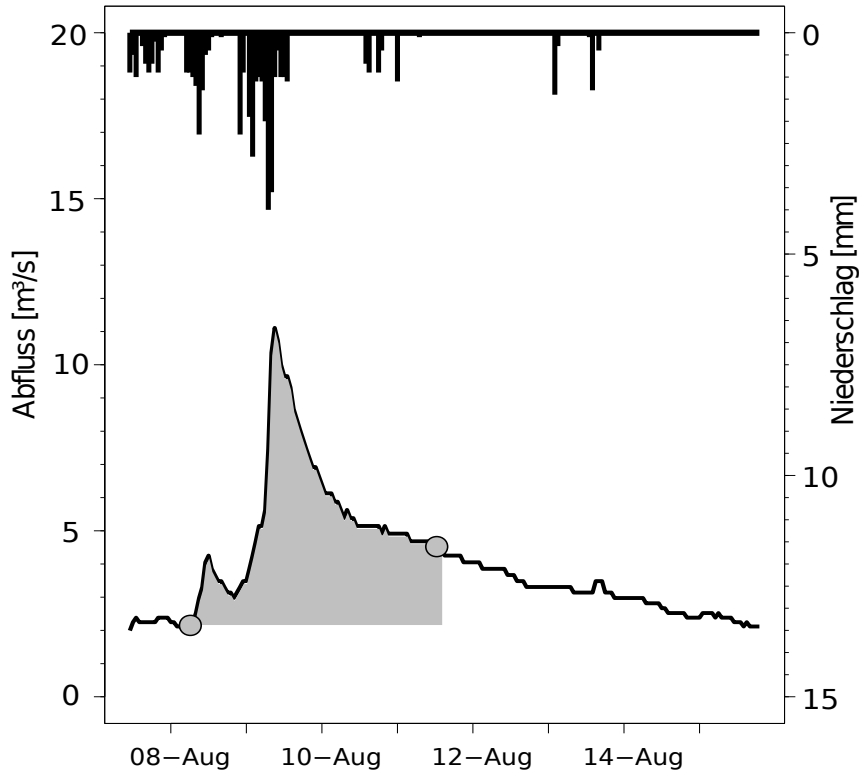


Abbildung 3: Skizze der Abflussganglinienseparation. Der graue Bereich definiert den Direktabfluss eines Abflussereignisses.

wobei y_i der Erwartungswert und x_i die Vorhersagevariable ist. Die beiden Funktionsparameter a (Y-Achsenabschnitt) und b (Steigung) werden variiert bis ein Minimum von RSS gefunden wird. Als Vorhersagevariable dient in diesem Fall der Ereignisniederschlag und als Zielvariable der Direktabfluss eines Ereignisses.

3.3.2 Korrelationsanalyse

Um die Zusammenhänge zwischen den Parametern der Einzugsgebiete und der Abflussbildung analysieren zu können, wurden die drei ersten Momente (arithmetisches Mittel, Variationskoeffizienten und Schiefe) der abgeleiteten Abflusskoeffizienten mit den Einzugsgebietsparametern korreliert (MERZ & BLÖSCHL, 2009).

Die Momente der Verteilung wurden wie folgt bestimmt:

$$\text{Mittelwert} \quad \overline{rc} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m rc_j \quad (4)$$

$$\text{Standardabweichung} \quad s_{rc}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (rc_j - \overline{rc})^2 \quad (5)$$

$$\text{Variationskoeffizienten} \quad CV = \frac{s_{rc}}{\overline{rc}} \quad (6)$$

$$\text{Schiefe} \quad v(rc) = \frac{m \sum (rc_j - \overline{rc})^3}{(m-1)(m-2) \cdot s_{rc}^3} \quad (7)$$

rc_j steht für den Abflusskoeffizient des Ereignisses, j ein selektiertes Ereignis und m steht für die Summe aller Ereignisse. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Abflussbeiwerte wie auch die Einzugsgebietsparameter normalverteilt sind, wurde der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman (r) verwendet um Abhängigkeiten von Abflusskoeffizienten zu physikalischen Einzugsgebietseigenschaften zu bewerten. Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten basiert auf folgender Gleichung.

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad \text{mit} \quad d_i = rk(x_i) - rk(y_i) \quad (8)$$

$rk(x_i)$ ist der Rang von x_i , wobei der höchste Wert den ersten Rang erhält und die niedrigste Rangnummer n . 'Spearman'-Korrelationskoeffizienten variieren zwischen 1 und -1. -1 entspricht einer komplett negativen und 1 einer komplett positiven Korrelation. Um Aussagen über einen Korrelationskoeffizienten machen zu können, ist es notwendig, diesen auf seine Signifikanz hin zu untersuchen. Dies wurde mittels des von BEST (1975) veröffentlichten Algorithmus, welcher in 'R' implementiert ist, für ein Signifikanzniveau von 95 % durchgeführt.

3.4 Niederschlags-Abflussmodell RoGeR

Das Modell RoGeR ('Runoff-Generation-Research Model') ist ein prozessorientiertes Niederschlags-Abflussmodell, das an der Professur für Hydrologie in Freiburg entwickelt wurde. Es dient der räumlich hoch aufgelösten Simulation ($5 \times 5 \text{ m}^2$) unterschiedlicher Abflussprozesse und ihrer Einflüsse auf die Abflussbildung. RoGeR ist nahezu vollständig in einem geographischen Informationssystem (GIS) implemen-

tiert und basiert auf Geodaten des Bundeslandes Baden-Württemberg. Im Gegensatz zu klassischen Niederschlags-Abflussmodellen werden die Modellparameter bei RoGeR nicht am Abfluss kalibriert, sondern leiten sich direkt von Literaturwerten und Ergebnisse aus Feldstudien ab. Dies hat den Vorteil, dass es auch in unbemessenen Einzugsgebieten anwendbar ist und zudem unter variierenden Bedingungen, wie z.B. für Klimawandelszenarien genutzt, werden kann (WABOA, 2007).

Die konzeptionalisierte Abflussbildung und die Abflussbildungsprozesse auf denen RoGeR grundlegend basiert, sind in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Relevant für diese Studie sind die drei Abflussprozesse HOF, SOF und der schnelle ZA. Bei der Berechnung der Abflusskoeffizienten wurde nur der ZA verwendet, der bis 48 h nach dem letzten Niederschlag zum Abflusspegel gelangt. Langsamere ZA, sowie Wasser, das in tiefere Schichten versickert (TP) wurde als Basisabfluss deklariert und damit als Nicht-Ereigniswasser

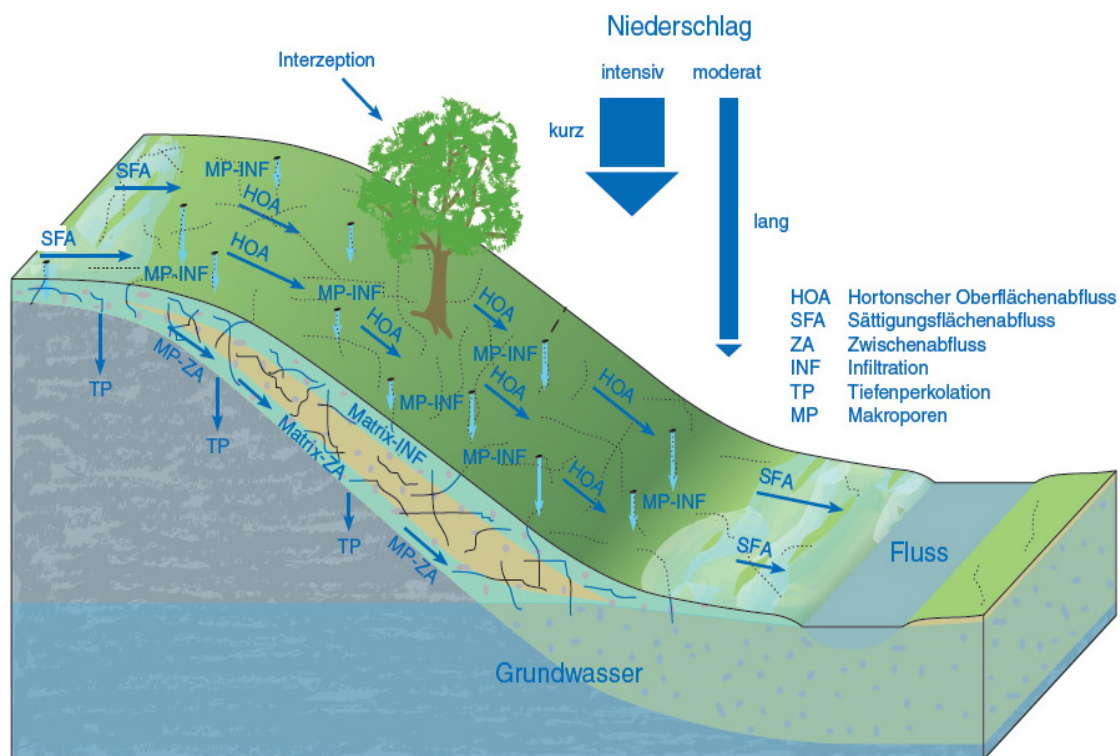


Abbildung 4: Konzeptionelle Darstellung der Abflussbildung auf der Hangskala aus dem WABOA (2007).

3.4.1 Simulation landesweiter Abflussbildungsszenarien

Mithilfe des Modells RoGeR wurden 12 Abflusssszenarien zur Charakterisierung der Abflussbildung für die 65 Untersuchungsgebiete simuliert. Ziel war es, eine möglichst breite Variation von unterschiedlichen Niederschlagsereignissen in Kombination mit variierenden Vorfeuchtebedingungen zu berechnen. Niederschlagsereignisse können im allgemeinen in konvektive Ereignisse, die durch eine lange Dauer und geringe Niederschlagsintensitäten gekennzeichnet sind und advektive Ereignisse mit kurzer Dauer und hoher Intensitäten eingeteilt werden. Deshalb sind sechs der 12 Szenarien typisch konvektive Niederschlagsereignisse mit einer Dauer von 24 h und Niederschlagssummen von 10, 20 und 40 mm. Die anderen sechs advektive Niederschlagsereignisse haben eine Dauer von 1 h mit Niederschlagssummen von 5, 10 und 15 mm. Bei allen Szenarien fällt der gesamte simulierte Niederschlag gleichmäßig auf jede Rasterzelle der Einzugsgebietsfläche und weist keine Niederschlagsspitzen oder Variationen auf. Jedes der Niederschlagsereignisse wurde einmal bei trockenen und einmal bei feuchten Bedingungen simuliert. Als trockene Bedingungen wurde das 10 % Quantil aller Bodenfeuchtwerte in einem Einzugsgebiet und als feuchte Bedingungen das 90 % Quantil genutzt. Die Bodenfeuchtwerte stammen aus Bodenfeuchtesimulationen des Grundwasserneubildungsmodells 'GWN-BW' im Zeitraum von 1971 bis Ende 2012. Zusätzlich konnte noch auf vier weitere landesweite Simulationen aus einer vorangegangenen Studie zurückgegriffen werden (WABOA, 2007). Bei diesen Szenarien handelt es sich um extreme Niederschlagsereignisse mit Niederschlagsintensitäten von 40 mm/h und $70 \text{ mm}/24\text{h}$ in Kombination mit Vorfeuchtebedingungen von 30 % und 90 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK) (Tabelle 2). Die räumlich aufgelösten Modellausgaben der Abflussbildungsprozesse wurden auf Einzugsgebietsebene gemittelt und für jedes Szenario wurden Abflussbeiwerte bestimmt. Diese Faktoren sind der Quotient aus dem Niederschlag durch die Summe der drei schnellen Abflusskomponente (HOF, SOF, ZA).

3.4.2 Abhängigkeiten zwischen Einzugsgebietsparametern und Abflusskomponenten

Um die Abhängigkeit zwischen Einzugsgebietsparametern und Abflusskomponenten aufzuzeigen, wurde der mittlere prozentuale Anteil der einzelnen Abflusskomponenten bei einem Abflussereignis mit den Parametern des Einzugsgebietes korreliert. Auch hier wurde der Spearman-Korrelationskoeffizient auf Basis von Gleichung 8 berechnet.

Tabelle 2: Zusammenfassung aller landesweiter RoGeR Szenarien für das Bundesland Baden-Württemberg

Szenario-Nr.	Niederschlags- dauer [h]	Niederschlags- menge [mm]	Vorfeuchte [% nFK]
1	1	5	Quantil 10
2	1	5	Quantil 90
3	1	10	Quantil 10
4	1	10	Quantil 90
5	1	15	Quantil 10
6	1	15	Quantil 90
7	24	10	Quantil 10
8	24	10	Quantil 90
9	24	20	Quantil 10
10	24	20	Quantil 90
11	24	40	Quantil 10
12	24	40	Quantil 90
13	1	40	30 % nFK
14	1	40	90 % nFK
15	24	70	30 % nFK
16	24	70	90 % nFK

3.5 Anpassen von Beta-Verteilungen

Bei den simulierten Szenarien fällt der Niederschlag gleichmäßig verteilt über die gesamte Einzugsgebietsfläche. In der Realität ist der Niederschlag jedoch sowohl räumlich als auch zeitlich stark heterogen (HÄCKEL, 2012). ZEHE et al. (2005) verglichen in ihrer Studie den Einfluss von räumlich hoch aufgelösten Niederschlägen mit gleichverteilten Niederschlägen auf die Modellausgabe. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass die Verwendung von gleichverteilten und räumlich verteilten Niederschlägen in keine direkte Beziehung zueinander gesetzt werden können. Dies gilt auch dann, wenn exakt die selben Niederschlagssummen auf die Einzugsgebietsfläche fallen. Dies macht einen direkten Vergleich zwischen den extrahierten Abflusskoeffizienten aus der automatischen Ereignisselektion und den summierten Abflusskoeffizienten bestehend aus HOF, SOF und ZA aus den Simulationen mit RoGeR, nur unzureichend möglich.

Um diese Problematik zu umgehen, wurden nach GOTTSCHALK & WEINGARTNER (1998) an alle simulierten (RoGeR) und empirischen Abflusskoeffizienten in einem Einzugsgebiet theoretische Beta-Verteilungen (Gleichung 10) angenähert. Der Vorteil ist, dass kein direkter Vergleich einzelner Abflusskoeffizienten notwendig ist, sondern

die Verteilung und damit die Abflusscharakteristik verglichen werden kann.

$$f(x|\alpha, \beta) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{(\alpha-1)} (1-x)^{(\beta-1)} \quad (9)$$

$$\text{mit } B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha) + \Gamma(\beta)} \quad (10)$$

x steht für die Abflusskoeffizienten und α und β sind die Parameter der Beta-Verteilung. Die kumulative Verteilungsfunktion wurde mittels der Maximierung der Anpassungsgüte ('Maximum-Goodness-of-Fit') auf das Gütemaß Kolmogorov–Smirnov Distanz angepasst. Bei der 'Maximum-Goodness-of-Fit' werden die Verteilungsparameter solange optimiert bis ein stabiles Minimum bzw. Maximum des Gütemaßes erreicht wird. Als Optimierungsalgorithmus dient die Downhill-Simplex-Methode nach NELDER & MEAD (1965), der ein globales Minimum im Parameterraum sucht. Um zu überprüfen, ob die angepassten theoretischen Verteilungen die empirischen und die modellierten Daten repräsentieren, wurden für jedes Einzugsgebiet zweiseitige Kolmogorov-Smirnov Tests durchgeführt. Beim zweiseitigen Kolmogorov-Smirnov Test wird geprüft, ob zwei Verteilungen (F_{emp} = empirische Verteilung und F_{theo} = theoretische Verteilung) den selben Ursprung besitzen. Die Nullhypothese $F_{emp}(x) = F_{theo}(x)$ wird bei einem Signifikanzniveau von 95 % beziehungsweise bei einem p-Wert von $p \leq 0.05$ angenommen.

3.6 'Random Forest'-Regression

'Random Forest' (RF)-Regressionen sind maschinelle Lernalgorithmen, bei denen die Beziehung zwischen einer Zielvariablen und ihrer potentiellen Vorhersageparametern gefunden werden soll. Dafür wird eine große Anzahl von unkorrelierten Entscheidungs- bzw. Regressionsbäumen mittels der CART-Methode (Classification And Regression Trees) generiert (BREIMAN et al., 1984). Jeder dieser Regressionsbäume besteht aus einer zufällig gewählten Anzahl von Vorhersagewerten (*engl.* bootstrap samples). Im Rahmen dieser Arbeit sind die Vorhersagewerte die einzelnen Einzugsgebiete. Jeder Knotenpunkt in einem Baum besteht wiederum nur aus einer kleineren Auswahl der Einzugsgebietsparameter wie z.B. der mittleren Einzugsgebietshöhe oder dem Anteil der flachgründigen Böden im Einzugsgebiet. Das Ergebnis aller Entscheidungsbäume wird gemittelt und bildet das Ergebnis einer 'Random Forest'-Regression. Sowohl bei der Auswahl der Einzugsgebiete wie auch bei Auswahl der Gebietsparameter ist es möglich, dass Werte auch mehrfach gewählt werden (Abbildung 5, BREIMAN (2001)).

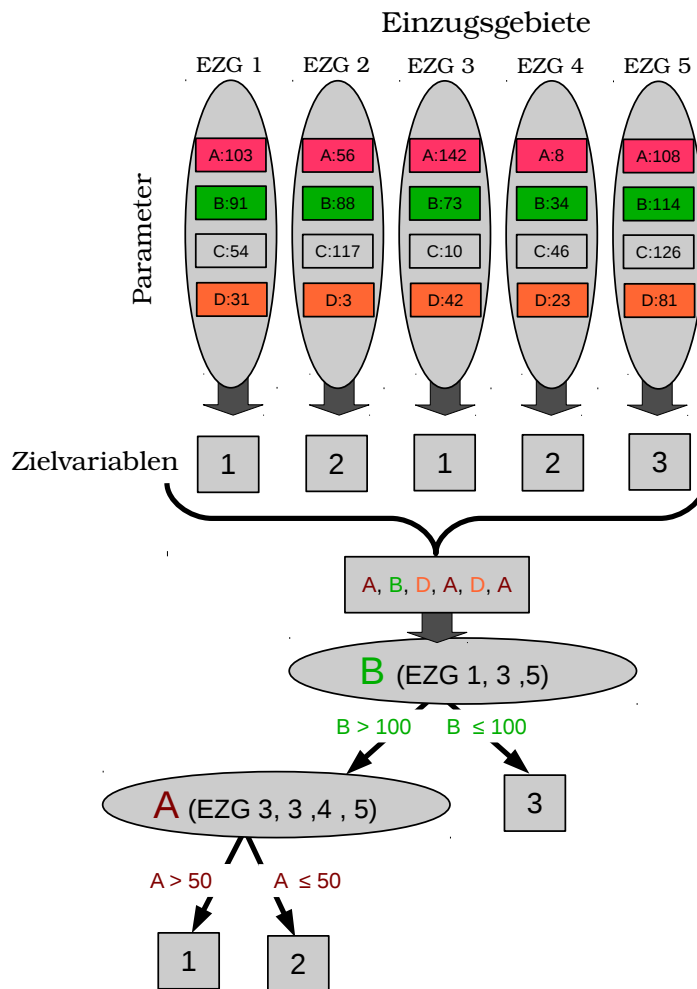
Durch die vielfache Erstellung von unterschiedlichen Entscheidungsbäumen ($n > 500$) mit zufälligen Faktoren und Variablen, ist der einzelne Baum selbst nicht aussagekräftig. Dies macht eine RF-Regression wie viele andere maschinelle Lernalgorithmen zu einem 'Black-Box'-Ansatz in dem Rückschlüsse auf das Ergebnis nicht in der Modellstruktur gesucht werden können (PRASAD et al., 2006). Allerdings gibt es mehrere Methoden, die eine Interpretation eines RF-Modells zulassen. Eine davon ist die Möglichkeit, die Einflussstärke eines einzelnen Vorhersageparameters auf eine bestimmte RF-Regression zu ermitteln. Hierbei werden die einzelnen Variablen eines Parameters zufällig gemischt, während alle anderen Parameter unverändert bleiben. Anschließend wird das Modell vor und nach der willkürlichen Mischung gegenübergestellt und die Abnahme der Modellgüte in $MSE_inc [\%]$ (prozentuale Zunahme des mittleren quadratischen Fehlers) bestimmt. Der Wert des $MSE_inc [\%]$ zeigt den Einfluss eines Parameters auf die Güte eines Modells (STROBL et al., 2009). Es ist wichtig zu erwähnen, dass dieser Wert nur als relative Einstufung zu verstehen ist und keine quantitativen Vergleiche mit anderen Studien zulässt. Dies liegt daran, dass jedes RF-Modell genau auf einen Trainingsdatensatz geschult und nur genau für diesen Parameterraum gültig ist. Zudem kann nur eine Aussage über die Einflussstärke einzelner Vorhersageparameter gemacht werden, wenn die erreichte Güte der Regression z.B. die erklärte Varianz (R^2) als ausreichend eingestuft werden kann (STROBL et al., 2008).

Die Modellgüte, gemessen anhand der erklärten Varianz (R^2), einer RF-Regression, kann durch die Zufälligkeit bei jedem Lauf leicht abweichen. Auch in dieser Studie konnten trotz der Wahl von 5000 Regressionsbäumen, die das Modell eigentlich stabilisieren sollten, je nach Lauf sehr unterschiedliche Bestimmtheitsmaße erzielt werden. Diese variierten in einem Bereich von $\pm 10 \%$. Deshalb wurde nach dem Vorbild von BACHMAIR & WEILER (2012) die beste Modellgüte gewählt, die iterativ durch zehnmaliges Wiederholen bestimmt werden konnte.

3.6.1 Simulation der Abflusscharakteristik mithilfe von RF

Mittels des Zusatzpakets 'randomForest' wurden in 'R' zwei RF-Regressionen an die abgeleiteten Verteilungsparameter α und β der empirischen Abflusskoeffizienten angepasst. Als Vorhersagewerte dienten die 65 Einzugsgebiete mit ihren 15 Einzugsgebietsparametern (Sektion 3.1.2), die aus den Geodaten des WABOA (2007) abgeleitet wurden.

Der in der R-Funktion enthaltene *mtree*-Parameter bestimmt die Anzahl der zu generierenden Bäume. Dieser wurde von 500 Bäumen auf 5000 Bäume erhöht, um ein



1.) Erstellen jeden Baumes mittels einer zufälligen Auswahl der Parameter ('Bootstrap resample'). Parameter dürfen auch mehrmals erscheinen.

2.) Für jeden Knotenpunkt werden nur eine gewisse Anzahl von Parametern verwendet, z.B. bei ersten Knotenpunkt nur EZG1, EZG 2 und EZG 4. Auch hier ist eine Doppelverwendung möglich.

3.) Vorgang n-mal mit n-Bäumen wiederholen. Bestimme das Mittel aller Ergebnisse der Entscheidungsbäume ('Aggregation').

Abbildung 5: Darstellung eines Entscheidungsbaumes für eine 'Random Forest' Regression (EZG = Einzugsgebiet)

stabileres Modell zu generieren. Für die Option *mtry*, die die Anzahl der zufällig gewählten Einzugsgebiete pro Baum bestimmt, wurde die Voreinstellung beibehalten. Bei dieser wird ein Drittel der Gesamtzahl der Vorhersageparameter verwendet. Modifikationen an diesem Parameter in einem vernünftigen Rahmen führen meist nur zu geringen Änderungen bei den Modellergebnissen (DÍAZ-URIARTE & ALVAREZ DE ANDRÉS, 2006).

Als Trainings- bzw. Testdatensatz dienten etwa die Hälfte der 65 Einzugsgebiete, die zufällig in zwei gleich große Gruppen eingeteilt wurden. Der Trainingsdatensatz dient der Schulung der RF-Regression und der Testdatensatz der eigentlichen Vorhersage der beiden Verteilungsparameter. Damit jedes Einzugsgebiet einmal sowohl im Trainings- und Testdatensatz zur Verwendung kommt, wurde die Einteilung nach erfolgreicher Simulation umgekehrt.

3.6.2 Zusätzliche Parameter für die RF-Regression

Einzugsgebiete, in denen nach RoGeR der Zwischenabfluss einen relevanten Teil des Abflusses ausmacht, zeigen die größten Abweichungen von den empirischen Abflusskoeffizienten. Dies gilt sowohl für die RoGeR, als auch für die RF-Regression. Da eine Erweiterung des Modells RoGeR sehr aufwendig ist, wurde getestet, ob durch hinzufügen von neuen Gebietsparametern die Abweichung der RF-Regression aus Abschnitt 3.7 verringert werden kann.

Der erste Zusatzparameter (kf-Parameter 1) wurde aus den Bodenkarten GK50000 des LGRB extrahiert. Er beinhaltet den Flächenanteil der Böden, die einen kf-Wert des Unterbodens kleiner 1 mm/h aufweisen oder bei denen der Unterboden einen geringeren kf-Wert aufweist als der Oberboden. Des weiteren wurde das 10 %- und 90 %-Quantil der Bodenfeuchtezeitreihe aus Abschnitt 3.1.1 des gesamten Modellierungszeitraums von 1971-2012 hinzugefügt (Bodenfeuchteparameter 1 & 2). Die drei Parameter wurden ausgewählt, da sie möglicherweise Indikatoren für das Auftreten von Zwischenabfluss sind. So ist der kf-Parameter ein Indikator für pedogene Schichtgrenzen, die neben geologischen Schichtgrenzen eine wichtige Rolle bei der Bildung von Zwischenabfluss spielen. Die beiden Bodenfeuchteparameter geben an, inwieweit die Bodenspeicher des Einzugsgebiets im Durchschnitt gesättigt sind. Der Speicherstand und die Vorfeuchtebedingung spielen bei der Konnektivität abflussrelevanter Flächen und beim Übergang von Wasser aus der Bodenmatrix in präferentielle Fließwege eine maßgebliche Rolle (SCHERRER & NAEF 2003; WEILER 2005; ZEHE et al. 2007).

3.7 Modellgüte

Um die Güte der RF-Regression und die des Modells RoGeR zu vergleichen, wurden für beide Ansätze die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (RMSE) mit den angenäherten Beta-Verteilung der empirischen Abflusskoeffizienten bestimmt. Mithilfe des RMSE ist es möglich, Abweichungen eines simulierten Werts von dem zu schätzenden Wert zu berechnen. Der RMSE dient damit dem Vergleich unterschiedlicher Schätzverfahren und wird wie folgt berechnet:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n [(sim_i - obs_i)^2] \frac{1}{n}} \quad (11)$$

sim steht für das Ergebnis des Schätzers und *obs* für den zu schätzenden Wert. Ein

kleiner RMSE bedeutet, dass Fehler und Varianz der Regression oder des Modells zum empirischen Abflusskoeffizient gering sind und im Umkehrschluss, dass bei einem hohen RMSE mit hohen Abweichungen vom Erwartungswert gerechnet werden muss. Der Vorteil des RMSE ist, dass er in derselben Einheit ausgegeben wird wie Ziel- und Schätzfunktion hier also in der dimensionslosen Einheit des Abflusskoeffizienten.

3.8 Simulation der Abflusssensitivität mithilfe von 'Random Forest' Regressionen

Für jedes Abflussereignis konnte mittels der automatischen EreignisSelektion neben dem Abflusskoeffizient auch die Ereignisbedingungen, wie die Vorfeuchte, die Dauer, die Niederschlagsintensität und die Niederschlagssumme abgeleitet werden (Abschnitt 3.3). Besonders die Vorfeuchte- und die Niederschlagsbedingungen bestimmen maßgeblich das Abflussverhalten und die Abflussbildungsprozesse in einem Einzugsgebiet (ZEHE & BLÖSCHL 2004; ZEHE et al. 2007; TRAMBLAY et al. 2011). Um den Zusammenhang dieser beiden Parameter besser zu verstehen wurde eine weitere RF-Regression trainiert. Als Vorhersageparameter dienten die vier Ereignisbedingungen und als Zielparameter der Abflusskoeffizient. Damit wurden für alle Einzugsgebiete individuelle RF-Regressionen trainiert. Als Trainingsdatensatz wurde der gesamte Datensatz und damit alle selektierten Ereignisse der einzelnen Einzugsgebiete verwendet.

Um anschließend zu testen wie die Einzugsgebiete auf verschiedene Vorfeuchte- und Niederschlagsbedingungen reagieren, wurden künstliche Ereignisse generiert. Bei diesen Ereignissen variieren Vorfeuchte und Niederschlagsintensität in 100 Schritten vom Minimal- bis zum Maximalwert der im jeweiligen Einzugsgebiet im Untersuchungszeitraum simuliert oder aufgezeichnet Vorfeuchte und Niederschlagsintensitäten. Die Dauer und die Niederschlagssumme bleiben konstant auf ihrem Mittelwert. Dadurch kann für einen großen und realistischen Bereich von Vorfeuchten und Niederschlagsintensitäten ein Abflusskoeffizient bestimmt werden.

3.8.1 Bestimmung des Sensitivitätsfaktor

Um herauszufinden, ob die Abflussbildung in einem Einzugsgebiet tendenziell eher von der Vorfeuchte oder von den Niederschlagsbedingungen abhängt, wurde ein Sensitivitätsfaktor entwickelt. Dieser Faktor basiert auf den künstlichen generierten Ereignisbedingungen aus Abschnitt 3.8 und den daraus resultierenden Abflusskoeffizi-

enten (Abbildung 6).

Die Abflusskoeffizienten werden jeweils am 10 % (Q10) und am 90 %-Quantil (Q90) der Vorfeuchte in Kombination mit dem 10 % und dem 90 %-Quantil der Niederschlagsintensität bestimmt.

- $P1 = Q10 \text{ Vorfeuchte} \setminus Q10 \text{ Niederschlagsintensität}$
- $P2 = Q90 \text{ Vorfeuchte} \setminus Q10 \text{ Niederschlagsintensität}$
- $P3 = Q10 \text{ Vorfeuchte} \setminus Q90 \text{ Niederschlagsintensität}$
- $P4 = Q90 \text{ Vorfeuchte} \setminus Q90 \text{ Niederschlagsintensität}$

Anschließend werden die Verhältnisse der Abflussbeiwerte für die Vorfeuchte (X1 & X2) und für die Niederschlagsintensität (Y1 & Y2) bestimmt.

$$X1 = \frac{P2}{P1} \Rightarrow \text{varierende Vorfeuchte} \mid \text{geringe Niederschlagsintensität} \quad (12)$$

$$X2 = \frac{P4}{P3} \Rightarrow \text{varierende Vorfeuchte} \mid \text{hohe Niederschlagsintensität} \quad (13)$$

$$Y1 = \frac{P3}{P1} \Rightarrow \text{geringe Vorfeuchte} \mid \text{varierende Niederschlagsintensität} \quad (14)$$

$$Y2 = \frac{P4}{P2} \Rightarrow \text{hohe Vorfeuchte} \mid \text{varierende Niederschlagsintensität} \quad (15)$$

Der Sensitivitätsfaktor ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der Summe von X1 und X2 durch die Summe von Y1 und Y2 (Gleichung 16). Einzugsgebiete, bei denen der Sensitivitätsfaktor kleiner eins ist, sind damit tendenziell sensitiv auf die Niederschlagsintensität. Dagegen sind Einzugsgebiete mit einem Sensitivitätsfaktor größer eins eher sensitiv auf die Vorfeuchte. Je weiter der Sensitivitätsfaktor von eins abweicht, desto eindeutiger ist die Abhängigkeit der Abflussbildung von der Vorfeuchte oder den Niederschlagsbedingungen.

$$\text{Sensitivitätsfaktor} = \frac{X1 + X2}{Y1 + Y2} \quad (16)$$

3.8.2 Sensitivitätsfaktor für RoGeR

Um zu testen, ob RoGeR die Sensitivität der Abflussbildung auf die Vorfeuchte oder die Niederschlagsintensität wiedergibt, wurde auch für die RoGeR-Ergebnisse

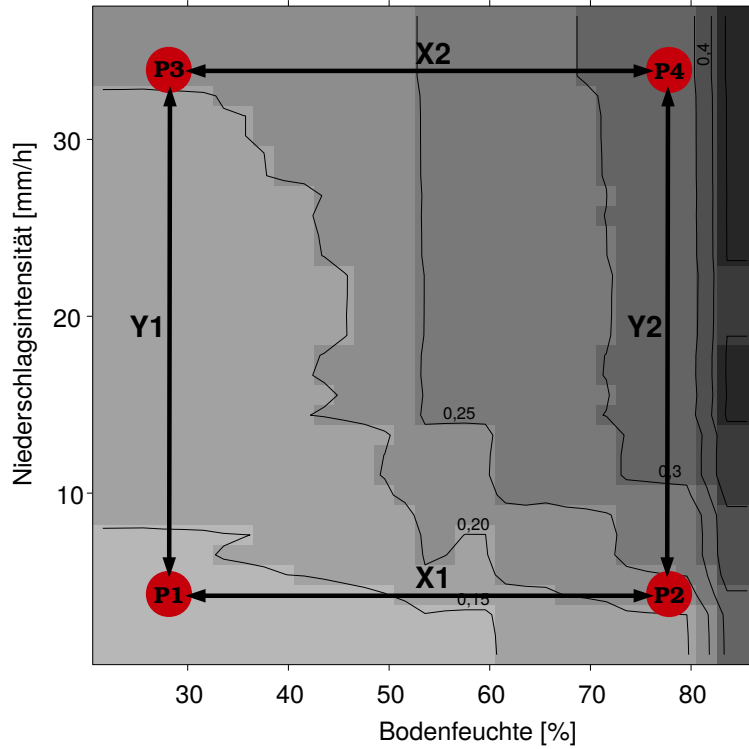


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Berechnung des Sensitivitätsfaktors. Als Grundlage dienen künstlich generierte Abflussereignisse die mithilfe einer RF-Regression Abflusskoeffizienten vorhersagen. Die Grafik ist eine dreidimensionale Darstellung der Abflusskoeffizienten eines Einzugsgebiets bei variierender Vorfeuchte und Niederschlagsintensität. Die dritte Dimension ist in Form der Graustufe aufgetragen. Helle Bereiche stehen für niedrige und dunkle Bereiche für hohe Abflusskoeffizienten.

ein Sensitivitätsfaktor berechnet. Er basiert nicht auf einer RF-Regression sondern direkt auf den Szenarien Nr. 1,2,5,6,7,8,11 und 12 aus Tabelle 3.

Für die 1 h Szenarien P1 bis P4 und die 24 h Szenarien P5 bis P8 werden jeweils die Verhältnisse $X1$, $X2$, $Y1$, $Y2$ nach Abschnitt 3.8.1 berechnet. Mit Gleichung 19 werden anschließend die Sensitivitätsfaktoren für einstündige und 24 h zusammengefasst.

$$\text{Sensitivität 1h} = \frac{X1 + X2}{Y1 + Y2} \quad (17)$$

$$\text{Sensitivität 24h} = \frac{X3 + X4}{Y3 + Y4} \quad (18)$$

$$\text{Sensitivität (RoGeR)} = \frac{1}{2}(\text{Sensitivität 1h} + \text{Sensitivität 24h}) \quad (19)$$

Tabelle 3: Gewählte RoGeR Szenarien zur Berechnung des Sensitivitätsfaktors

Nr	Ereignisdauer [h]	Szenario-Nr	Niederschlag [mm]	Vorfeuchte [%]
P1	1	1	5	Q10
P2	1	2	5	Q90
P3	1	5	15	Q10
P4	1	6	15	Q90
P5	24	7	10	Q10
P6	24	8	10	Q90
P7	24	11	40	Q10
P8	24	12	40	Q90

4 | Ergebnisse

4.1 Automatische Ereignisselektion

Der mittlere Abflusskoeffizient, die mittlere Ereignisdauer sowie die Gesamtanzahl der selektierten Ereignisse aller Einzugsgebiete sind als kumulative Verteilungen in Abbildung 7 dargestellt. Die mittleren Abflusskoeffizienten bewegen sich in einem Bereich von 0,02 bis 0,37 und sind durch einen Median von 0,13 gekennzeichnet. Die durchschnittliche Ereignisdauer ist bei 57 der Einzugsgebiete unter 100 h und liegt nur bei vier Ereignissen darüber. Die Anzahl der ausgewählten Abflussereignisse ist je nach Untersuchungsgebiet sehr unterschiedlich und variiert zwischen 37 und 140 Ereignissen. Insgesamt wurden 5250 Ereignisse selektiert. Auch der Wertebereich der mittleren Dauer der Abflussereignisse ist mit einem Minimum von 24 h und einem Maximum von 233 h deutlich unterschiedlich.

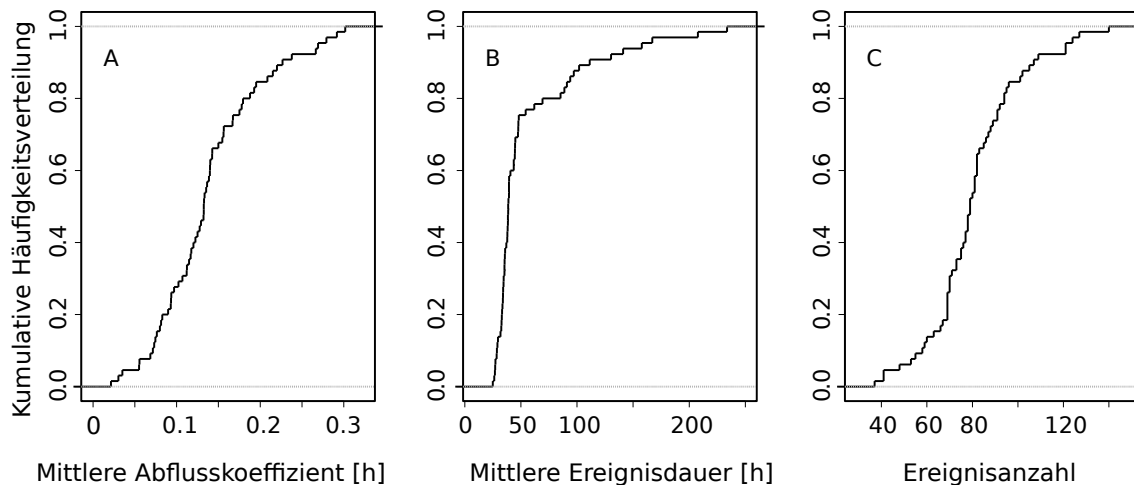


Abbildung 7: Kumulative Häufigkeitsverteilungen; (A) der mittleren Abflusskoeffizienten, (B) der mittleren Ereignisdauer und (C) der Anzahl der selektierten Ereignisse für die 65 ausgewählten Einzugsgebiete. Die Daten basieren auf Abflussdaten und wurden mittels einer automatischen Ereignisselektion extrahiert.

Abbildung 8 zeigt den Mittelwert der Abflusskoeffizienten der einzelnen Einzugsgebiete gegen die jeweilige Standardabweichung, Schiefe und den Variationkoeffizienten (CV) aus Abschnitt 3.3.2. Daraus wird deutlich je höher der mittlere Abflusskoeffizient in einem Gebiet ist, desto stärker variieren seine einzelnen Abflusskoeffizienten (Spearman-Korrelationskoeffizient = 0,88). Im Gegensatz dazu nimmt die Schiefe der Verteilung mit zunehmendem Mittelwert ab (Spearman-Korrelationskoeffizient = -0,67). Bei Einzugsgebieten, die durch einen hohen mittleren Abflusskoeffizienten

gekennzeichnet sind, ist die Variabilität zwischen den Ereignissen in Bezug auf den Mittelwert klein.

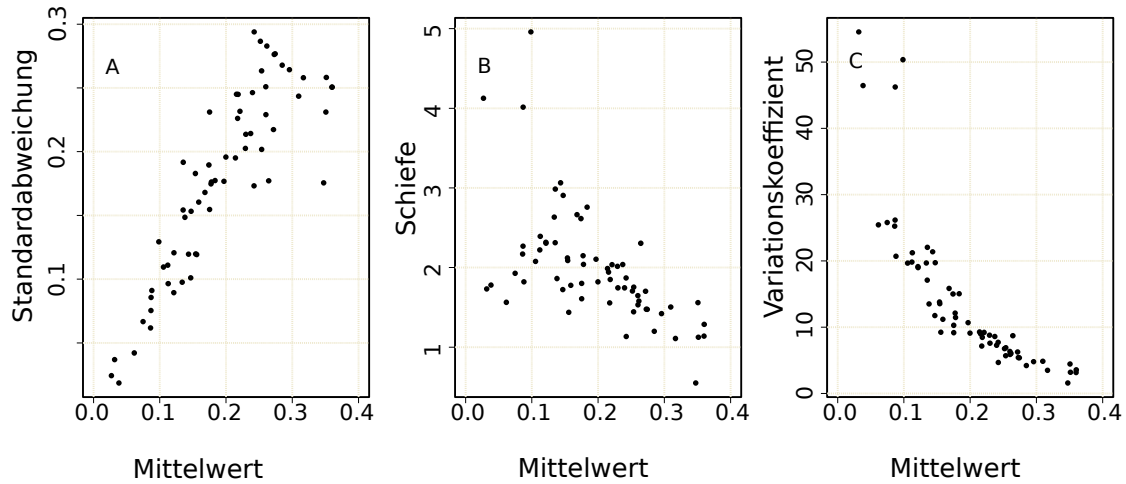


Abbildung 8: Statistische Momente der Abflusskoeffizientenverteilungen der Einzugsgebiete; (A) die Standardabweichung, (B) die Schiefe und (C) der Variationskoeffizient jeweils gegen den mittleren Abflusskoeffizient eines Einzugsgebiets.

Um die unterschiedlichen Abflusscharakteristiken der Einzugsgebiete in Baden-Württemberg darzustellen, sind in Abbildung 9 und 10 drei Untersuchungsgebiete exemplarisch ausgewählt und dargestellt. Die drei Einzugsgebiete repräsentieren unterschiedliche Formen der Abflussbildung im Hinblick auf die durchschnittlichen Höhe und Verteilung der Abflusskoeffizienten. In Abbildung 9 ist der Direktabfluss gegen den Ereignisniederschlag für alle Abflussereignisse abgebildet. Des weiteren sind für jedes Einzugsgebiet die linearen Regressionsmodelle hinzu skizziert. Der Abfluss am Giebach reagiert verhältnismäßig linear auf verschiedene Niederschlagsereignisse ($R^2=68,59\%$), d.h. dass hohe Niederschläge meist auch zu hohen Abflüssen führen. Im Gegensatz dazu sind im Fall des Billinger Bachs im ausgewählten Untersuchungszeitraum kaum nennenswerte Abflussreaktionen auf verschiedene Ereignisniederschläge zwischen 9 mm und 42 mm zu verzeichnen. Dies spiegelt sich auch im schwachen linearen Zusammenhang von Abflusshöhe und Niederschlagssumme wieder, der mit einem R^2 von 17,47% sehr niedrig ist. In Abbildung 10 sind die kumulativen Häufigkeitsverteilungen der Abflusskoeffizienten der drei ausgewählten Einzugsgebiete abgebildet. Die Abflussreaktionen am Giebach variieren stark und verteilen sich auf einer weiten Skala. Am Billinger Bach dagegen sind die Abflusskoeffizienten deutlich niedriger und nur sehr wenige Abflusskoeffizienten erreichen Werte über 0,2. Die Verteilung ist mit einer Schiefe von 2,16 deutlich asymmetrischer als die des Giebachs mit 1,1. Die Stunzach liegt in der Abflusscharakteristik zwi-

schen den beiden anderen Einzugsgebieten und bereits 80 % der Ereignisse besitzen einen Abflussbeiwert über 0,2.

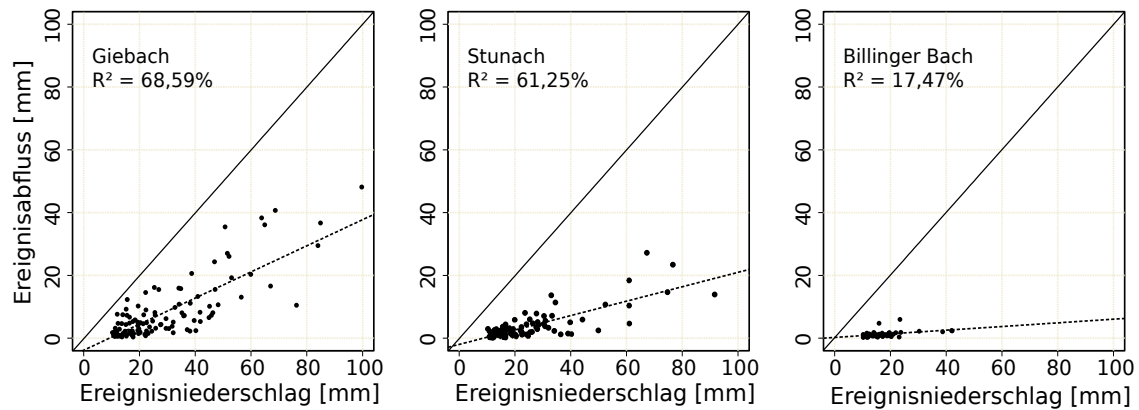


Abbildung 9: Ereignisniederschlag gegen Ereignisabfluss in drei Einzugsgebieten in Baden-Württemberg: Lochhammer / Giebach (29,02 km²), Heilbronn / Billinger Bach (42,46 km²), Gruol / Stunzach (76,12 km²). Jeder Punkt repräsentiert ein Abflussereignis. Die gestrichelte Linie ist die lineare Regressionsgerade und die durchgängige Linie das 1:1 Verhältnis von X- zu Y-Achse.

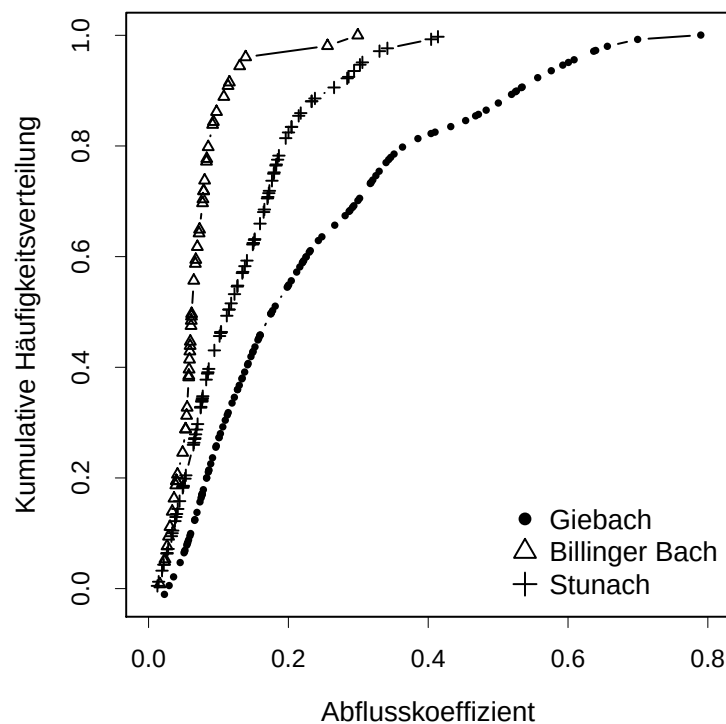


Abbildung 10: Kumulative Verteilungsfunktionen der mithilfe der automatischen EreignisSelektion extrahieren Abflusskoeffizienten für drei Einzugsgebiete in Baden-Württemberg. Lochhammer / Giebach (29 km²), Heilbronn / Billinger Bach (42,46 km²), Gruol / Stunzach (76,12 km²).

Abbildung 11 stellt die räumliche Verteilung der 65 ausgewählten Einzugsgebiete und die dazugehörigen mittleren Abflusskoeffizienten in Baden-Württemberg dar. Mit einem Minimum von 0,05 im Einzugsgebiet Hausen/Saubach im Süden Baden-Württembergs und einem Maximum von 0,37 im Einzugsgebiet Oberried/Brugga im Süd-Schwarzwald. Man erkennt, dass die Gebiete im Schwarzwald, im Südwesten Baden-Württembergs, tendenziell höhere mittlere Abflusskoeffizienten aufweisen. Gebiete im Südosten Baden-Württembergs dagegen meist zu niedrigeren durchschnittlichen Abflusskoeffizienten neigen.

4.1.1 Korrelationsanalyse

Die Korrelationen der statistischen Momente der Abflusskoeffizienten mit den Einzugsgebietsparametern sind in Tabelle 4 dargestellt. Die mittleren Abflusskoeffizienten zeigen im Vergleich zu den Schiefen und den Variationskoeffizienten im Allgemeinen die höchste Korrelation mit den Gebietsparametern. Besonders die Abhängigkeiten zwischen Variationskoeffizient und Einzugsgebietsparametern sind im Vergleich niedrig und nur zwei der Werte werden bei einem Signifikanzniveau von 95 % als signifikant eingestuft.

Den größten Einfluss auf den Abfluss haben die klimatischen und topographischen Parameter. Insbesondere der mittlere jährliche Niederschlag sowie die mittlere Einzugsgebietssteigung, sind mit Korrelationskoeffizienten von im Mittel 0,74 und 0,61 hervorzuheben. Bei den Bodenparametern zeigen sich höhere Korrelationen primär bei tiefgründigen, tonhaltigen und sandigen Böden. Mit Werten von -0,54 und 0,46 sind die Korrelationen jedoch schwächer als die mit den klimatisch und topographischen Parametern. Bei der Landnutzung spielen vor allem die bewaldete Fläche sowie Ackerflächen eine wichtige Rolle. Der Anteil der verdichteten Fläche und der Anteil der Feuchthflächen im Einzugsgebiet zeigen mit den durchschnittlichen Abflusskoeffizienten keine signifikante Abhängigkeit. Jedoch sind schwache Korrelationen mit den Schiefen und den Variationskoeffizienten bestimmbar.

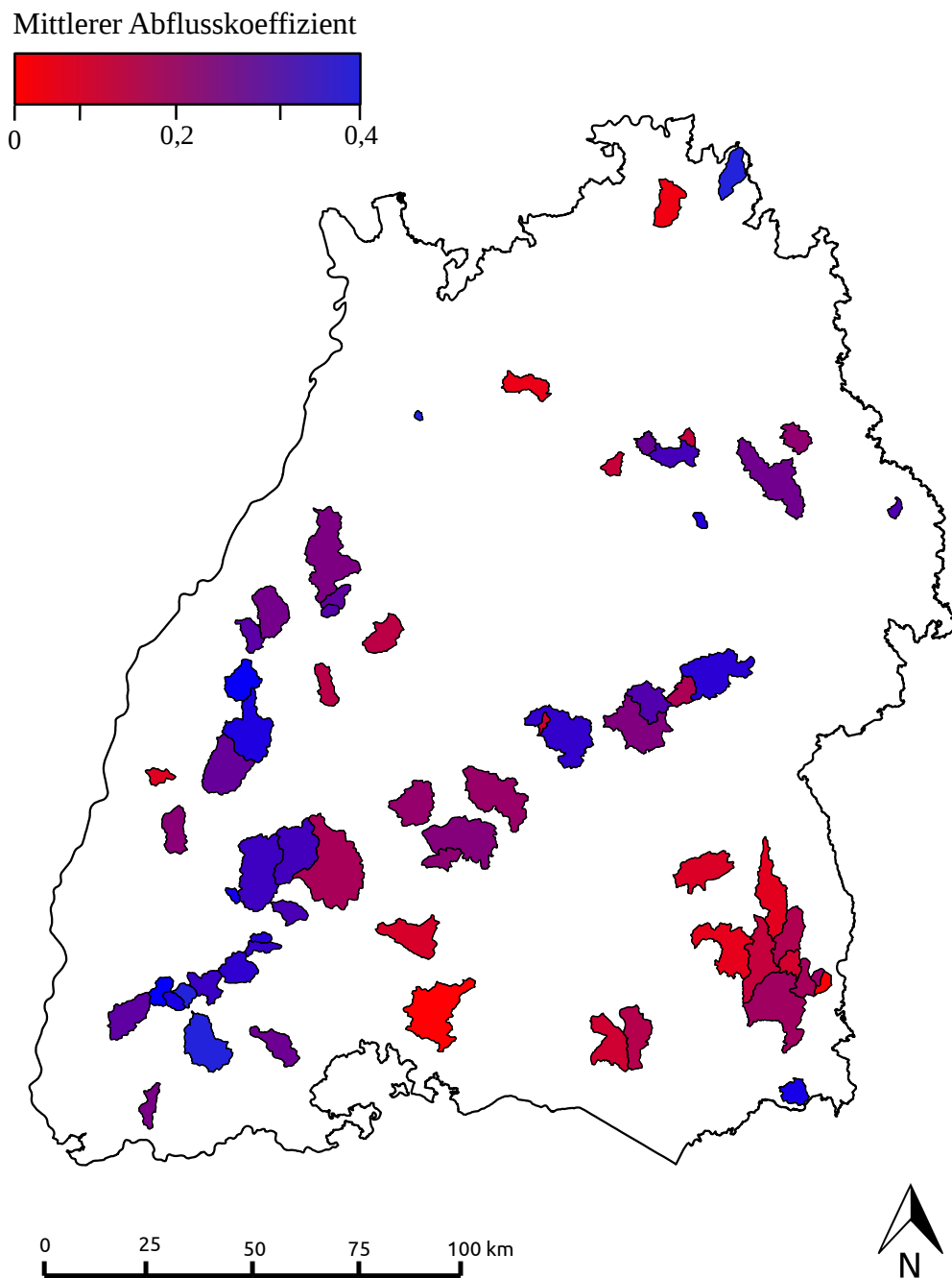


Abbildung 11: Räumliche Verteilung der mittleren Abflusskoeffizienten für die 65 ausgewählten Einzugsgebiete in Baden-Württemberg. Die mittleren Abflusskoeffizienten wurden mithilfe einer automatischen Ereignisselektion extrahiert.

Tabelle 4: Spearman-Korrelationskoeffizienten* der mittleren Abflusskoeffizienten, der Schiefe und des Varianzkoeffizienten gegen die 16 Einzugsgebietsparameter

Einzugsgebiets- parameter	Mittelwert	Schiefe	Variations- koeffizient
Klimatische und topographische- Parameter			
- Mittlerer jährlicher Niederschlag [mm]	0,74	-0,54	0,17
- Mittlere Einzugsgebietssteigung [%]	0,61	-0,3	0,18
- Mittlere Einzugsgebietshöhe [m]	0,49	-0,37	0,09
- Einzugsgebietsfläche [km ²]	-0,04	0,28	0,02
Landnutzungsparameter			
- Bewaldeter Einzugsgebietsanteil [%]	0,56	-0,31	-0,07
- Verdichteter Einzugsgebietsanteil [%]	-0,05	0,28	0,01
- Feuchtflächen im Einzugsgebiet [%]	0,22	-0,15	0,25
- Ackerfläche im Einzugsgebiet [%]	-0,41	0,06	0,04
Bodenparameter			
- tiefgründige Böden [%]	-0,54	0,28	0,14
- mittelgründige Böden [%]	0,26	-0,15	-0,18
- flachgründige Böden [%]	0,09	0,07	0,1
- Ton dominierte Böden [%]	-0,42	0,3	-0,04
- Lehm dominierte Böden [%]	-0,21	0,14	0,21
- Sand dominierte Böden [%]	0,46	-0,17	-0,23
- Karst [0/1]	-0,2	0,23	0,05

*signifikante Korrelationskoeffizienten
sind fett gedruckt

4.2 Abflussbildungszenarien

In Abbildung 12, 13 und 14 sind die prozentualen Anteile der einzelnen schnellen Abflussbildungsprozesse am gesamten Abfluss, der mit RoGeR simuliert wurde, dargestellt. Einzugsgebiete im Schwarzwald (Südwesten) sind meist durch hohe ZA-Anteile gekennzeichnet und durch niedrige HOF-Werte. Im Gegensatz dazu sind die meisten Einzugsgebiete im Osten und in der Mitte Baden-Württembergs durch hohe HOF-Werte und niedrige ZA-Werte geprägt. SOF spielt besonders in Einzugsgebieten im äußersten Süd-Osten und Nord-Osten der Untersuchungsregion eine maßgebliche Rolle.

Die einzelnen Abflusskomponenten sind durch den Aufbau von RoGeR stark an

Tabelle 5: Korrelationskoeffizienten* der simulierten Abflusskomponenten basierend auf den RoGeR-Szenarien gegen die 16 Einzugsgebietsparameter

Einzugsgebietsparameter	HOF	SOF	ZA
Klimatische und topographische Parameter			
- Mittlerer jährlicher Niederschlag [mm]	-0,67	-0,1	0,61
- Mittlere Einzugsgebietssteigung [%]	-0,5	-0,34	0,7
- Mittlere Einzugsgebietshöhe [m]	-0,42	-0,07	0,44
- Einzugsgebietsfläche [km ²]	-0,14	0,11	-0,01
Landnutzungsparameter			
- Bewaldeter Einzugsgebietsanteil [%]	-0,53	-0,14	0,61
- Verdichteter Einzugsgebietsanteil [%]	0,32	-0,36	-0,04
- Feuchtflächen im Einzugsgebiet [%]	-0,34	0,27	0,12
- Ackerfläche im Einzugsgebiet [%]	-0,39	0,31	0,22
Bodenparameter			
- tiefgründige Böden [%]	0,42	0,08	-0,53
- mittelgründige Böden [%]	-0,39	0,28	0,17
- flachgründige Böden [%]	0,13	-0,31	0,15
- Ton dominierte Böden [%]	0,62	0,26	0,35
- Lehm dominierte Böden [%]	-0,01	0,26	-0,2
- Sand dominierte Böden [%]	-0,56	-0,09	0,48
- Karst [0/1]	0,56	-0,42	-0,17

*signifikante Korrelationskoeffizienten
sind fett gedruckt

die Topographie und die dominierenden Bodenbedingungen der Einzugsgebiete gebunden (Tabelle 5). Steile und tendenziell gut durchlässige, sandige Einzugsgebiete

sind meist durch einen hohen ZA-Anteil gekennzeichnet. Flachere und tonhaltige Einzugsgebiete weisen gegensätzlich hohe HOF und geringe ZA-Anteile auf. Das Auftreten von SOF kann im Vergleich mit ZA und HOF räumlich nur unzureichend eingegrenzt werden, tritt aber tendenziell eher in flachgründigen Einzugsgebieten mit hohem Tonanteilen auf. Der mittlere jährliche Niederschlag zeigt, wie aus Tabelle 4 ersichtlich, die stärksten Abhängigkeiten mit den Abflusskomponenten HOF und ZA. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass HOF und ZA sich in fast allen Korrelation gegenläufig verhalten. Ist der Zusammenhang mit einem Parameter für HOF hoch und positiv, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass er auch für ZA hoch aber negativ ist. SOF zeigt selten starke Zusammenhänge mit Gebietseigenschaften, was der visuellen Eindruck der räumlichen Verteilung bestätigt.

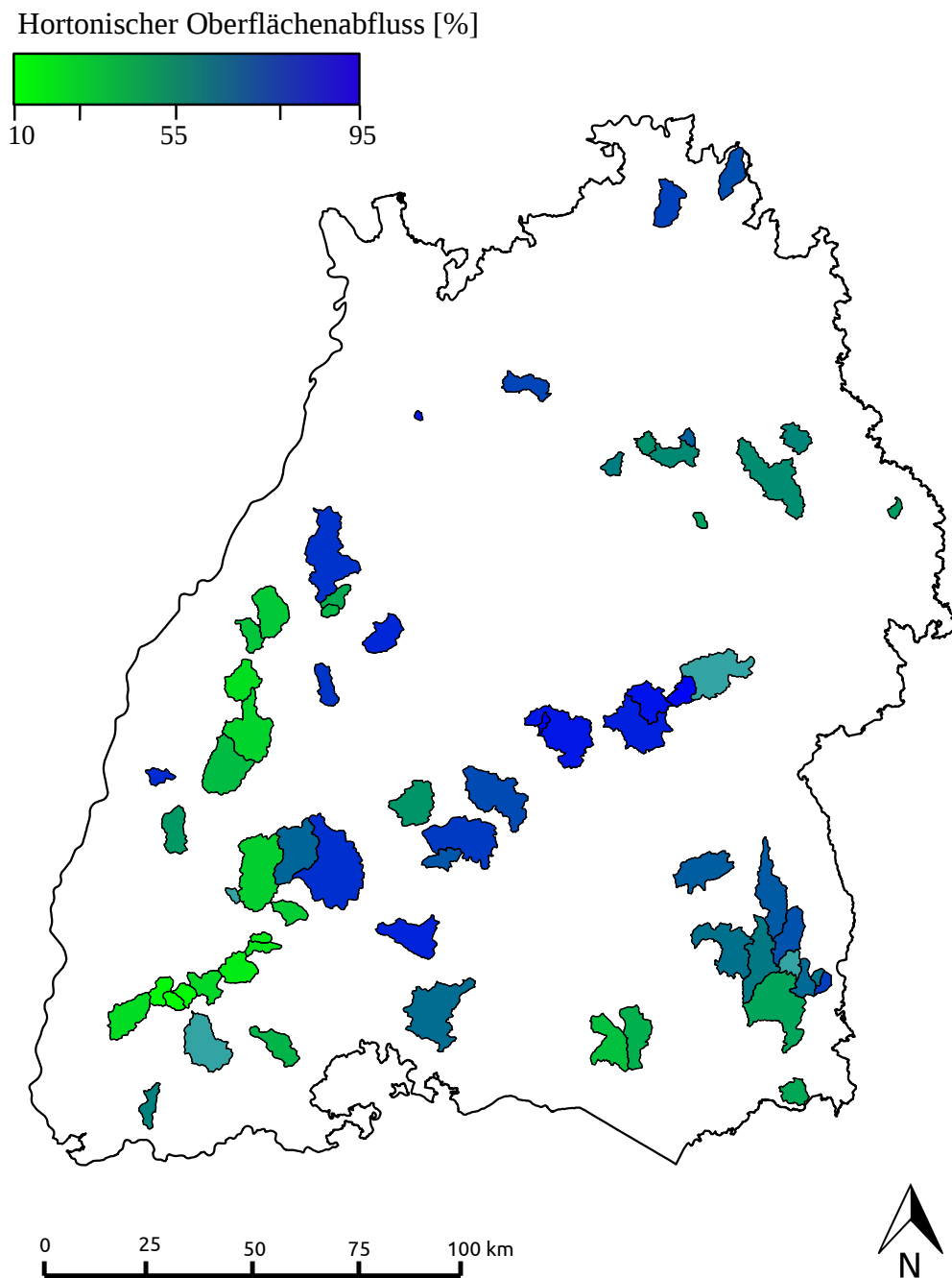


Abbildung 12: Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg mit ihrem simulierten, prozentualen Anteil des hortonischen Oberflächenabflusses (HOF) am Abfluss. Die Werte basieren auf den simulierten RoGeR-Szenarien. Einzugsgebiet im Südwesten besitzen meist einen geringen Anteil HOF am Gesamtabfluss, Gebiete im Osten dagegen hohe Anteile von bis zu 95 %

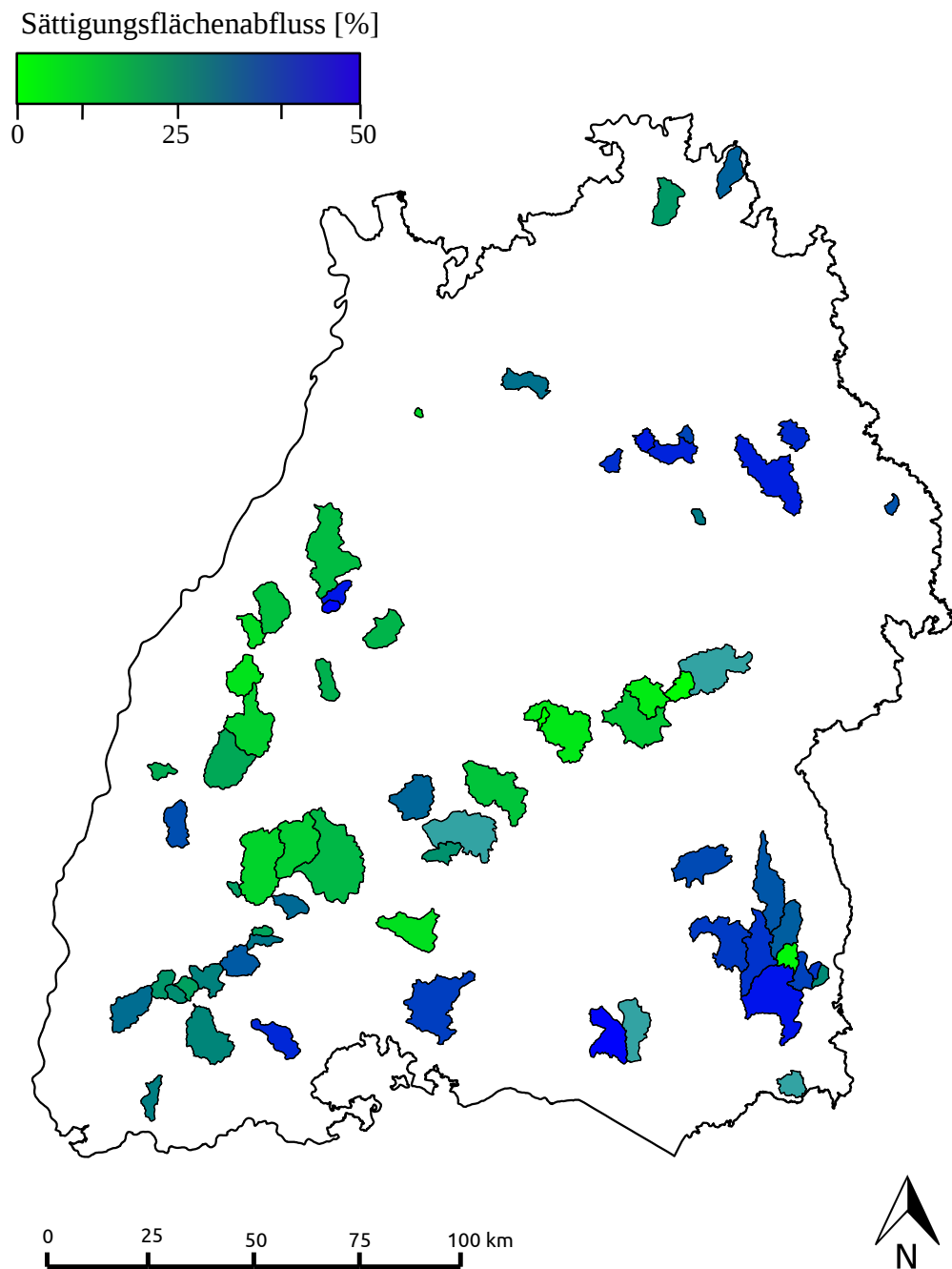


Abbildung 13: Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg mit ihrem simulierten, prozentualen Anteil des Sättigungsflächenabflusses (SOF) am Abfluss. Die Werte basieren auf den simulierten RoGeR-Szenarien. Einzugsgebiete im Westen Baden-Württembergs ist der Anteil von SOF am Abfluss tendenziell am geringsten. Dagegen bestehen bis zu 50 % des simulierten Abflusses im Osten der Region aus SOF

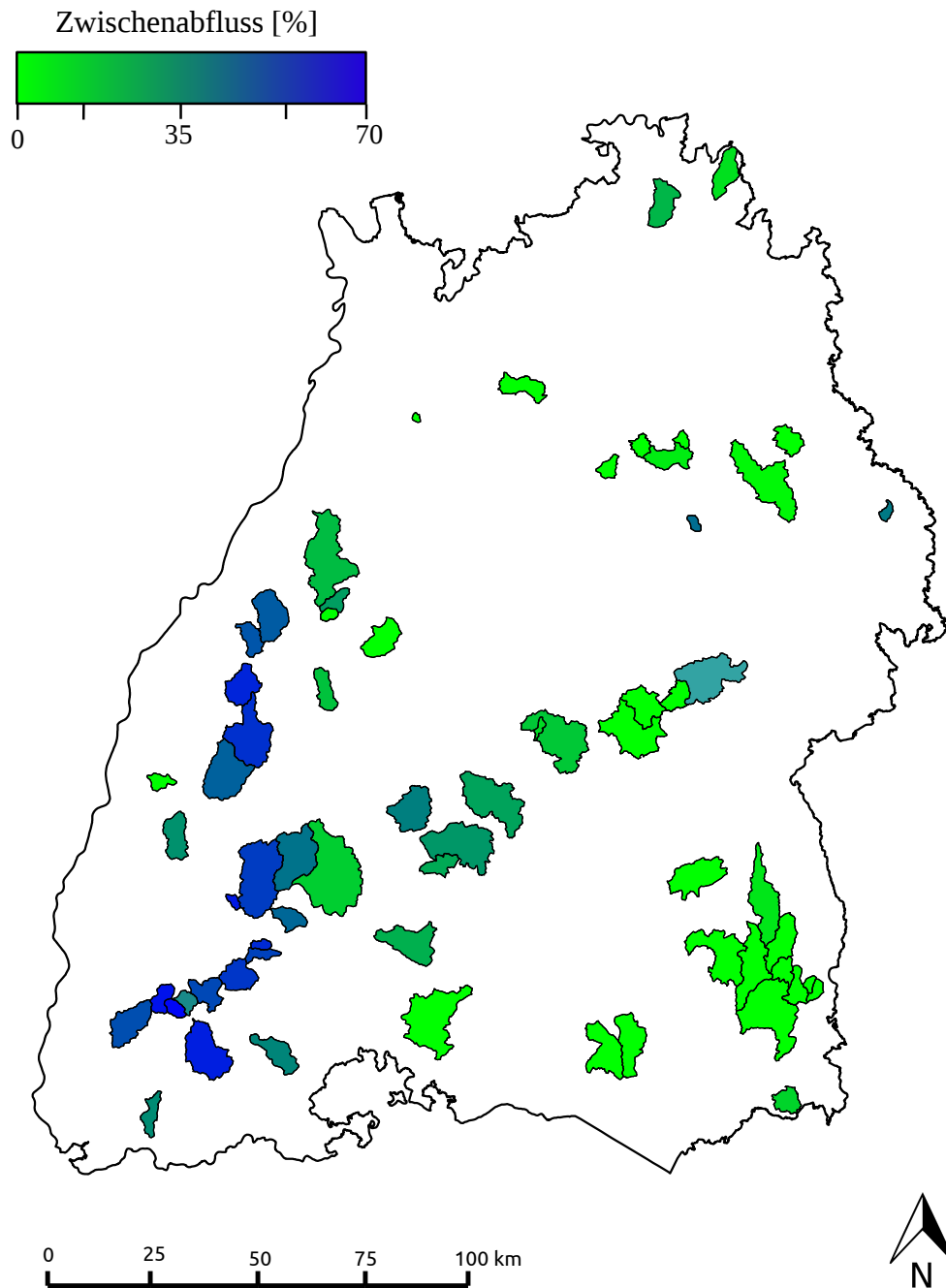


Abbildung 14: Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg mit ihrem simulierten, prozentualen Anteil des Zwischenabflusses (ZA) am Abfluss. Die Werte basieren auf den simulierten RoGeR-Szenarien. Im Osten Baden-Württembergs ist der ZA kaum bis gar nicht an der Abflussbildung beteiligt. Im Westen, besonders im Schwarzwald, dagegen ist er häufig die dominierende Größe.

4.3 Abflussbildung

Der RMSE aufgetragen für die auf RoGeR und die auf den RF-Regressionen basierenden Beta-Verteilungen gegen die empirischen Beta-Verteilung sind in Abbildung 15 als kumulative Häufigkeitsverteilung dargestellt. Die RMSE des Modells RoGeR sind im Mittel um 0,01 größer als die der RF-Regressionen. Auch die Standardabweichung von 0,052 zu 0,035 ist bei RoGeR höher, als bei den beiden RF-Regressionen. Im Mittel liegen die Abweichungen von RoGeR bei 0,067 mit einem Maximum von 0,24 und die der beiden RF bei 0,057 mit einem Maximum von 0,17.

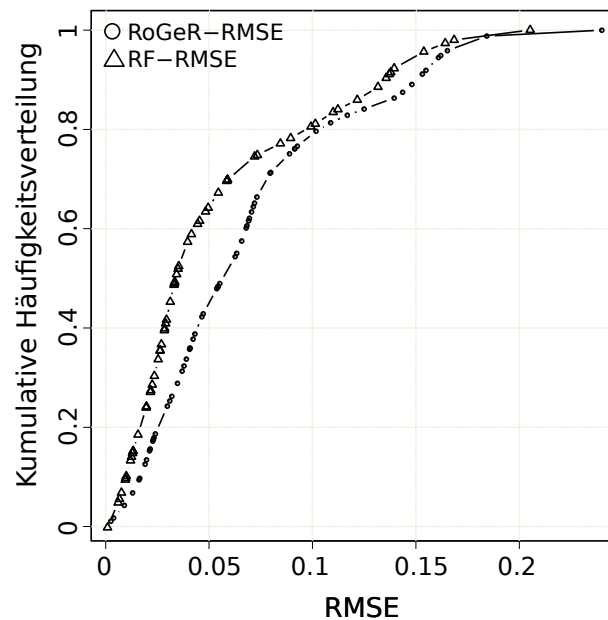


Abbildung 15: Die kumulative Häufigkeitsverteilung RMSE der Beta-Verteilung der RoGeR-Simulationen der RF-Regressionen von den Beta-Verteilungen der empirischen Abflusskoeffizienten.

Abbildung 16 zeigt die α und β Parameter der RF-Regressionen und des Modells RoGeR aufgetragen gegen die Parameter der Beta-Verteilung der empirischen Abflusskoeffizienten für jedes der gewählten Einzugsgebiete. Die Simulationsergebnisse der RF-Regressionen weichen im Mittel dimensionslos um 0,54 für α und um 16,24 für β ab. Die mittleren Abweichungen der RoGeR-Simulation liegen mit Abweichungen für α von 5,01 und für β von 74,49 dagegen deutlich höher. Um die jeweilige Streuung der Daten zu verdeutlichen sind zusätzlich die 80 %-Quantile der mittleren Abweichung in Abbildung 16 eingezeichnet. Die 80 %-Quantile für die RF-Regressionen für α 0,74 und für β 18,9 sind deutlich kleiner als die der RoGeR-Simulation mit Werten für α von 2,56 und für β von 59,4.

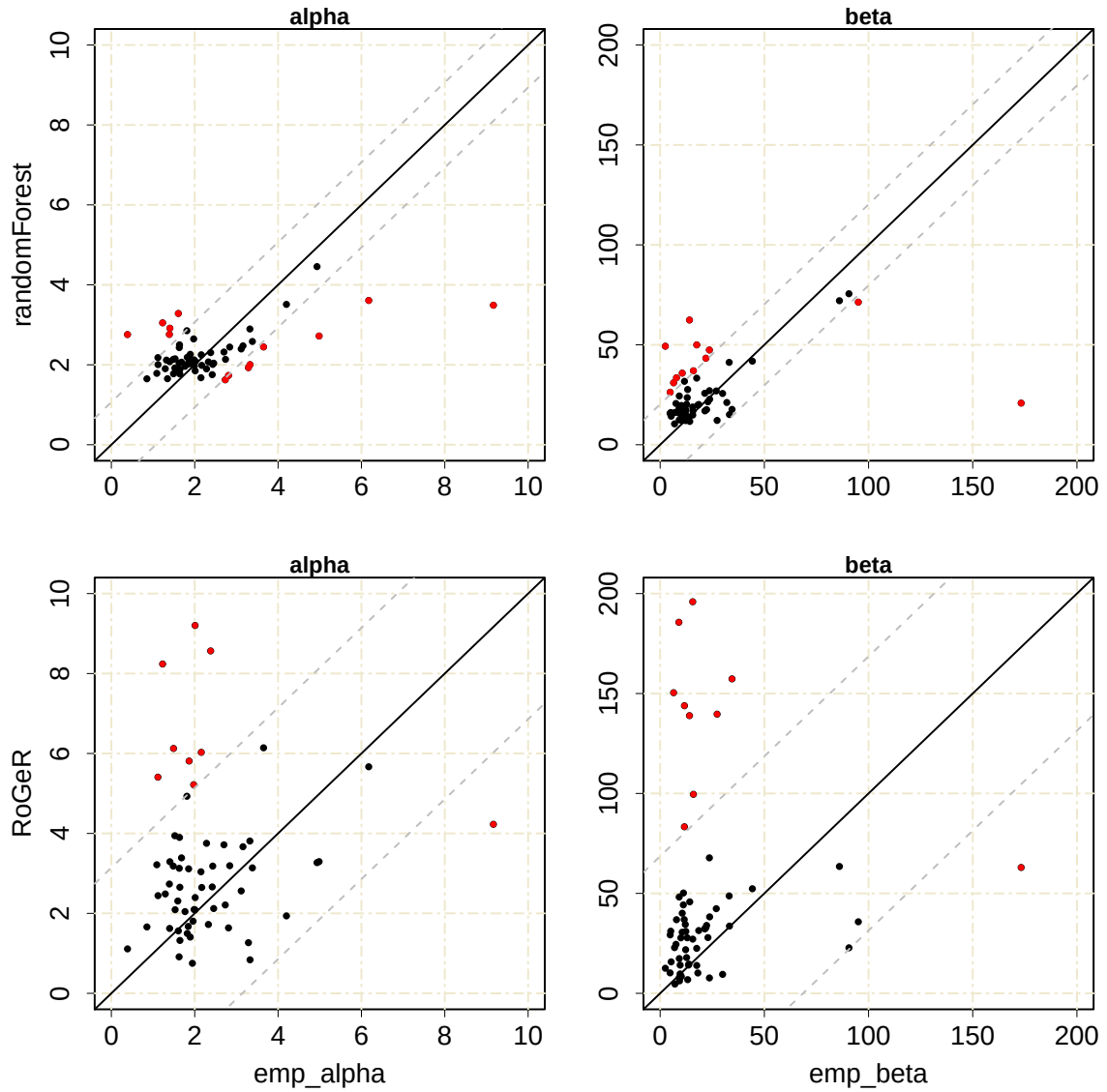


Abbildung 16: Modellierter α und β Parameter der RF-Regressionen und des Modells RoGeR gegen die Parameter der empirischen Beta-Verteilung. Zusätzlich ist jeweils das 80 %-Quantil der Differenz der empirischen zu den beiden simulierten Verteilungsparametern als gestrichelte Linie eingezeichnet. Rote Punkte stehen für Einzugsgebiete, bei denen die Abweichung zwischen den simulierten und empirischen α und β Parametern größer ist als, das jeweilige 80 %-Quantil.

Abbildung 17 zeigt die kumulativen Häufigkeitsverteilungen der empirischen und simulierten Abflusskoeffizienten und der jeweiligen angenäherten Beta-Verteilung der Einzugsgebiete aus Abschnitt 4.1. Die simulierten Werte weichen am Giebach mit einem RMSE von 0,16 deutlich von den empirischen Daten ab (Abbildung 17 (A1)). Das Einzugsgebiet ist eines derjenigen, die die höchsten Abweichungen zu den empirischen Abflusskoeffizienten aufweisen. Im Gegenzug dazu, sind die RMSE der Stunzach und des Billinger Bachs mit 0,013 und 0,016 im Verhältnis sehr klein. Auch visuell gleichen sich die Kurven in Abbildung 17 (A2) und 17 (A3) sehr. Die

angenäherten Beta-Verteilung an die empirischen Abflusskoeffizienten und an die mit RoGeR simulierten Koeffizienten sind in den Abschnitten B und C der Abbildung 17 dargestellt. Die RMSE der RF-Regressionen und der RoGeR-Simulationen sind in Abbildung 18 gegen die Beta-Verteilungen der empirischen Abflusskoeffizienten aus Abschnitt 3.7 aufgetragen. Es besteht eine starke, signifikante Abhängigkeit zwischen den RMSE der Simulation und der der Regressionen (Spearman-Korrelationskoeffizient = 0,66), d.h. dass von RoGeR simulierte Abflussbildungen in Einzugsgebieten, die starke Abweichungen zu den empirischen Daten aufweisen, tendenziell auch durch hohe Abweichungen bei den RF-Regressionen gekennzeichnet sind.

In Abbildung 18 ist zusätzlich der prozentuale Anteil des Zwischenabflusses am Gesamtabfluss der einzelnen Einzugsgebiete als Punktgröße eingetragen. Es besteht eine signifikante Korrelation zwischen den RMSE der RoGeR-Simulationen und den Anteilen des Zwischenabflusses von 0,45. Im Gegensatz dazu besteht keine signifikante Abhängigkeit zwischen den anderen beiden schnellen Abflusskomponenten (HOF und SOF). Zusammenfassend weisen Einzugsgebiete, mit hohem Zwischenabflussanteil sowohl bei den RF-Regressionen, wie auch bei der RoGeR-Simulation stärkere Abweichungen auf, als Einzugsgebiete in denen ZA nur einen geringen oder keinen Anteil an der simulierten Abflussbildung hat.

In Abbildung 19 sind die gemittelten kumulativen Häufigkeitsverteilungen der empirischen und der mit RoGeR simulierten Abflusskoeffizienten aller Einzugsgebiete in denen ZA quantitativ die größte Abflusskomponente darstellt abgebildet. Zusätzlich sind gestrichelt jeweils das Minimum und das Maximum der Ursprungsverteilungen eingezeichnet. Es zeigt sich, dass die von RoGeR modellierten Werte allesamt geringere Abflusskoeffizienten aufweisen, als dies bei den empirischen Daten der Fall ist. Selbst die Maxima und Minima der empirischen und der mittels RoGeR simulierten Verteilungen überschneiden sich nicht. Die Hälfte aller Abflussereignisse in ZA dominierten Einzugsgebieten, die auf den empirischen Werten basieren, weisen einen Abflusskoeffizienten von 0,17 auf. Dagegen erreichen diesen Wert nur ca. 10 % der Abflusskoeffizienten die auf RoGeR basierenden. RoGeR unterschätzt damit tendenziell die Abflussreaktion in Einzugsgebieten in denen ZA die größte Abflusskomponente ist.

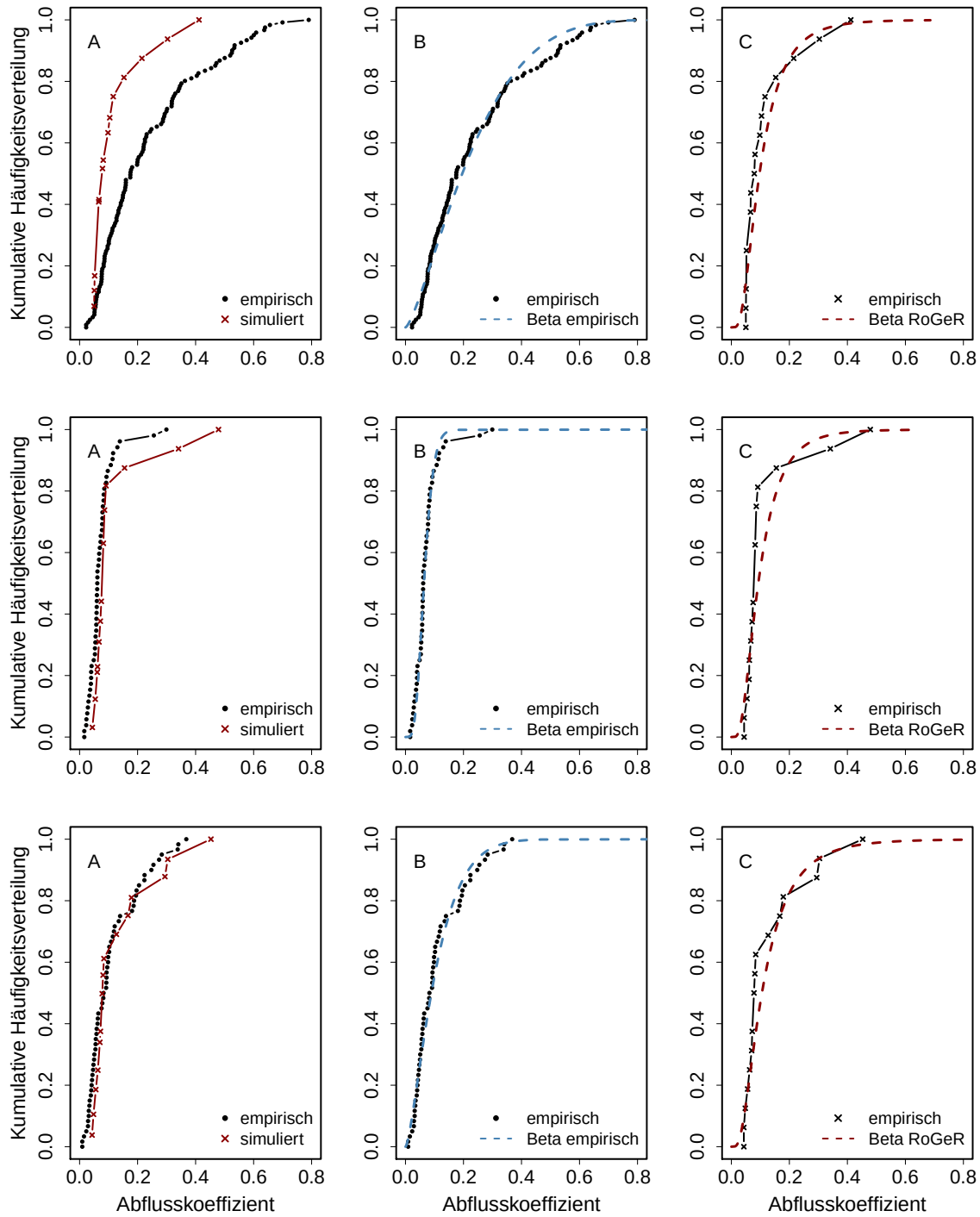


Abbildung 17: Exemplarisch ausgewählte kumulative Häufigkeitsverteilungsfunktionen der empirischen (schwarz) und simulierten (rot) Abflusskoeffizienten des Giebaches (A1), des Billinger Bachs (A2) und der Stunzach (A3). An die empirischen Abflusskoeffizienten angenäherten Beta-Verteilungen (blau, gestrichelt) sind in Abbildungsabschnitt B1, B2 und B3 dargestellt. Die Beta-Verteilungen (rot, gestrichelt), die an die mit RoGeR simulierten Abflusskoeffizienten angenähert wurden, sind im Abbildungsabschnitt C1, C2 und C3 skizziert.

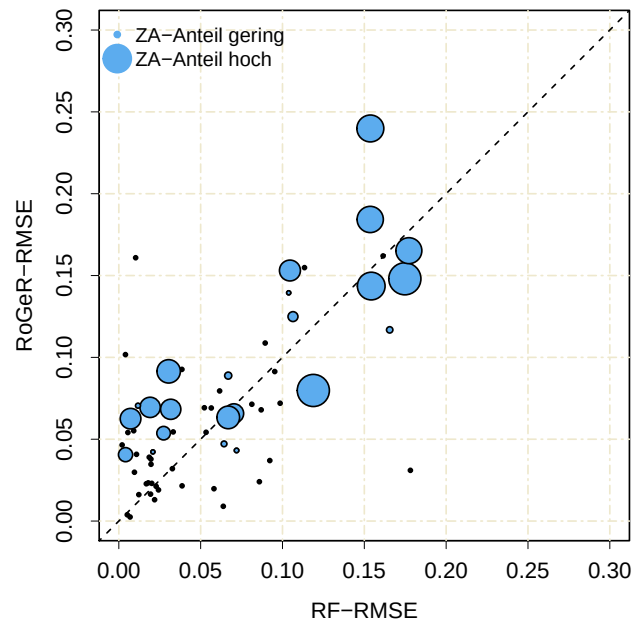


Abbildung 18: Gegeneinander aufgetragene RMSE der RF-Regressionen und der RoGeR-Simulation von den empirischen Beta-Verteilung. Der prozentuale Zwischenabfluss am von RoGeR simulierten Gesamtabfluss wird durch die Punktgröße skizziert. Einzugsgebiete, welche ausschließlich durch schwarze Punkte gekennzeichnet sind, weisen keinen Zwischenabfluss auf.

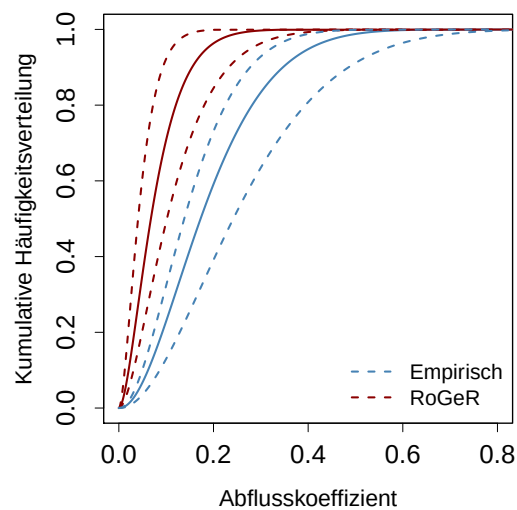


Abbildung 19: Kumulative Häufigkeitsverteilung der mittleren empirischen und von RoGeR simulierten Abflusskoeffizienten der Einzugsgebiete in denen ZA prozentual, die dominante Abflusskomponente ist. Gestrichelte Linien sind jeweils das Minimum und Maximum der Ursprungsdaten.

4.4 RF-Regression mit Zusatzparametern

Die Abweichungen der RF-Regression mit und ohne den drei neu extrahierten Parametern ist in Abbildung 20 dargestellt. Wie in Abbildung 18 werden prozentuale Zwischenabflussanteile am Abfluss durch die Punktgröße skizziert. RMSE der RF-Regression ohne Zusatzparameter sind im Mittel mit 0,058 etwas höher als die der RF-Regression mit Zusatzparametern. Der Spearman-Korrelationskoeffizient mit einem Wert von 0,96 zeigt jedoch die starke Abhängigkeit der beiden Ergebnisse.

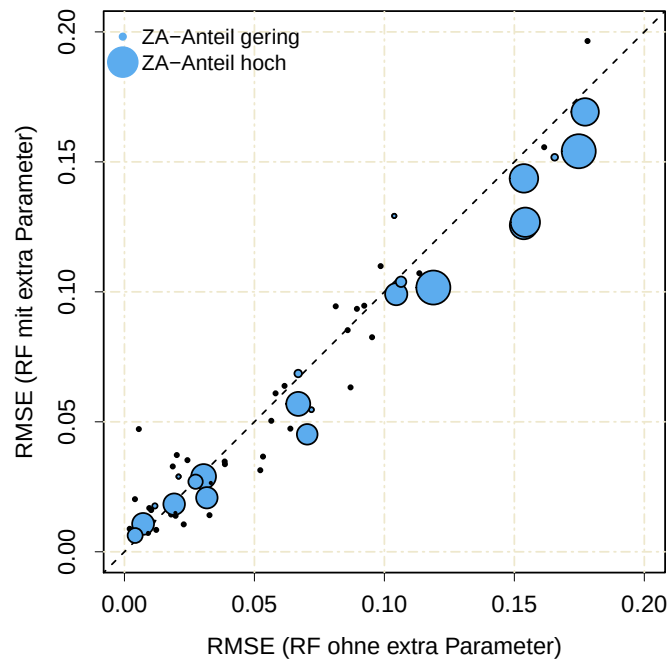


Abbildung 20: Abweichung der RF-Regression mit und ohne den drei neu extrahierten Einzugsgebietsparametern (kf-Parameter, Bodenfeuchteparameter) von den Beta-Verteilungen der empirischen Abflusskoeffizienten. Die Punktgröße wird durch den prozentualen Anteil des Zwischenabfluss am Gesamtabfluss bestimmt, welcher mit dem Modell RoGeR simuliert wurde.

Abbildung 21 zeigt die Einflussgröße der einzelnen Parameter auf die beiden RF-Regressionen mit den zusätzlich entwickelten Parametern, die die Verteilungsparameter α und β prognostizieren. Der mittlere jährliche Niederschlag, der Waldanteil und die Einzugsgebietshöhe sind die einflussreichsten Parameter auf die Modellgüte ($\text{MSE_inc}[\%]$) der RF-Regression mit der Zielvariablen α . Bei der RF-Regression, die den β Parameter der theoretischen Verteilung bestimmt, sind die Einzugsgebietssteigung, der Ackeranteil sowie der Anteil der tiefgründigen Böden im Einzugsgebiet die entscheidenden Parameter.

Mit einer erklärten Varianz von 53,86 % weicht die Regression, die α abschätzt, geringfügig weniger von den Ursprungsdaten ab, als die der β Regression. Die neu

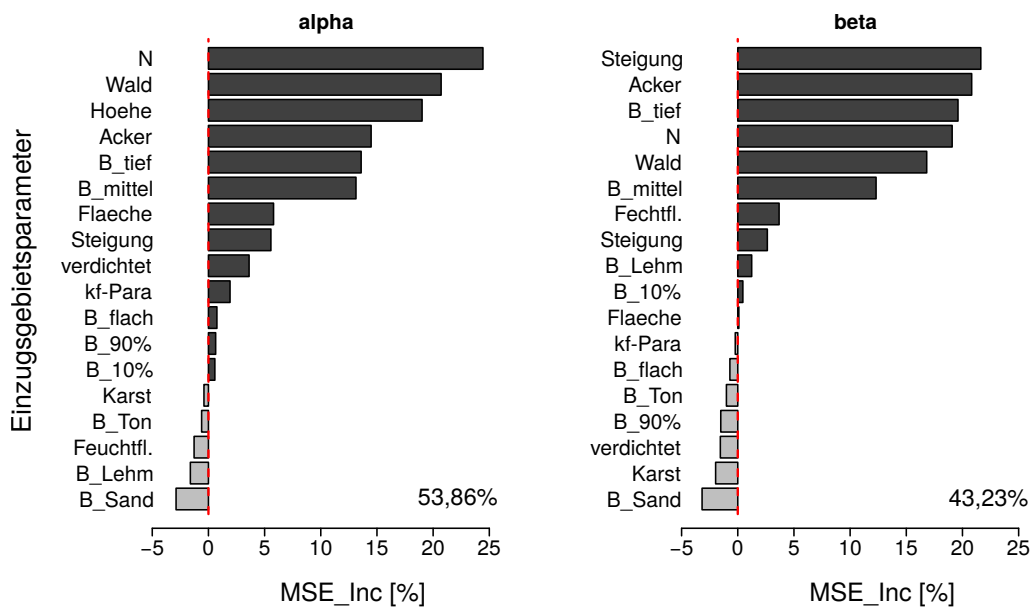


Abbildung 21: Die x-Achse zeigt die prozentuale Zunahme des mittleren quadratischen Fehlers (MSE_inc [%]) wenn die Position eines Parameter zufällig verändert wird. Die erklärte Varianz der beiden RF-Regressionen stehen am rechten unteren Rand der Grafik.

hinzugefügten Parameter aus Abschnitt 3.6.2 haben auf α nur einen sehr geringen Einfluss und erhöhen die erklärte Varianz um 3,21 %. Auf die RF-Regression, die β vorhersagt besitzen die neu gewählten Parameter einen negativen Einfluss. Dies bedeutet, dass das Modell bessere Ergebnisse im Hinblick auf die MSE_inc [%] liefert, wenn der Parameter 'B_90%' und 'kf-Para' an zufälligen Positionen im Datensatz verwendet wird. Dies bestätigt sich auch in der geringen Abnahme der erklärten Varianz um 2 Prozentpunkte, wenn die Zusatzparameter nicht mit einbezogen werden.

4.5 Sensitivitätsanalyse auf Vorfeuchte und Niederschlagsintensität

Die Reaktion des Abflusses auf unterschiedliche Bodenfeuchtebedingungen und Niederschlagsintensitäten ist in Abbildung 22 aufgetragen. Die dreidimensionalen Oberflächen basieren auf einer RF-Regression, die anhand von empirischen Ereignisbedingungen in einem Einzugsgebiet trainiert und anschließend mit variierenden Vorfeuchte und Niederschlagswerten Abflusskoeffizienten wiedergibt. Anhand dieser Sensitivitätsoberflächen kann abgeleitet werden, wie sich der Abfluss in einem Einzugsgebiet auf wechselnde Vorfeuchte oder Niederschlagsintensität auswirkt. In Abbildung 22 wurde eine dreidimensionale Darstellung gewählt, um Grenzwerte und Anstiege besser zu verdeutlichen.

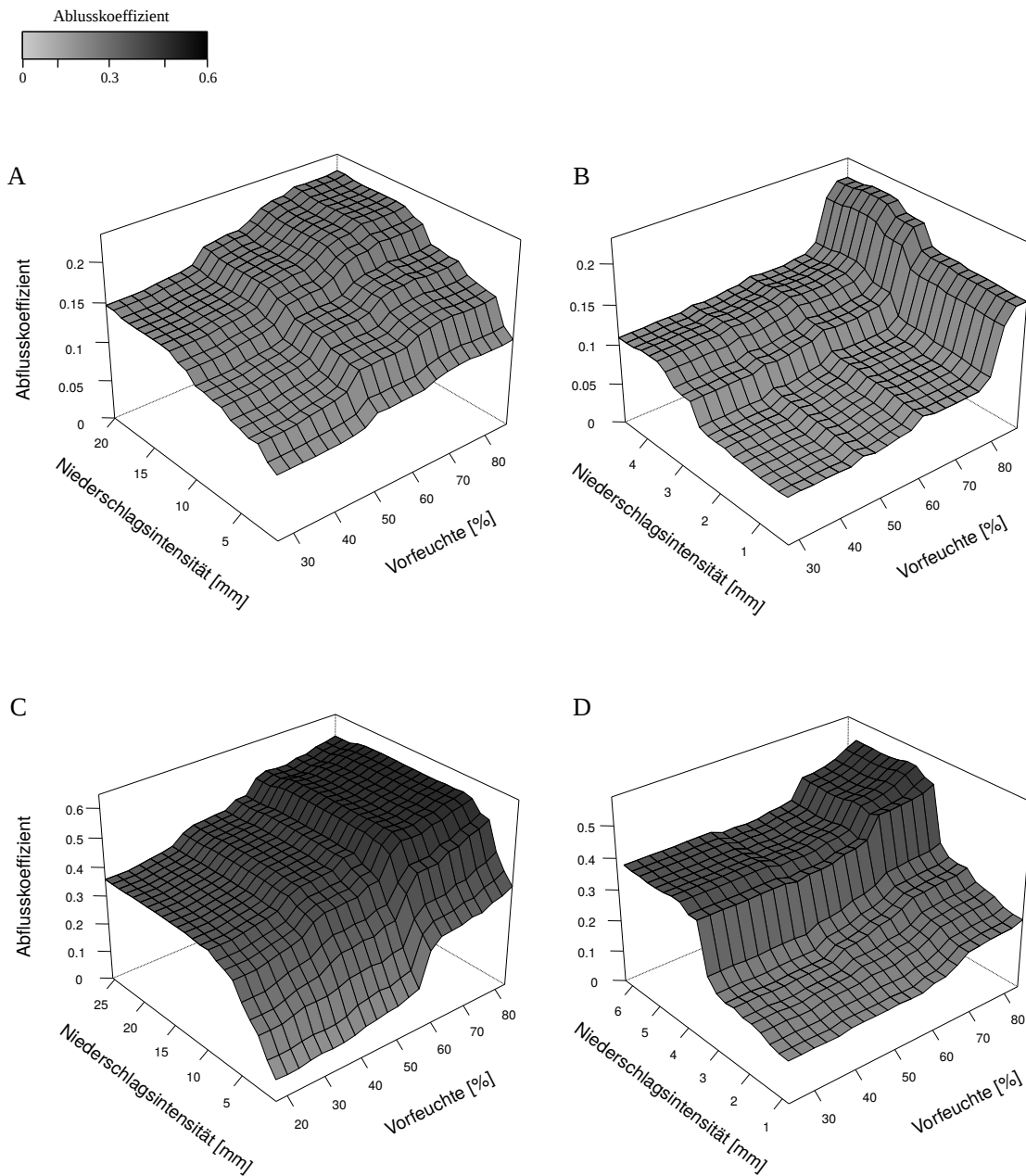


Abbildung 22: Abflussbildung in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität (Sensitivitätsflächen). Für jede Vorfeuchtebedingung und Niederschlagsintensität kann die Höhe der Abflussreaktion, in Form des Abflusskoeffizienten abgelesen werden. Im Abschnitt (A) ist das Einzugsgebiet der Wuracher Ach (Reichenhofen), in (B) das des Billinger Bach (Heilbronn), in (C) der Giebach (Lochhammer) und in (D) die Lauter (Unterlenningen) abgebildet.

Das Einzugsgebiet des Billinger Baches (B) zeigt bis zu einem Vorfeuchtwert von 75 % kaum eine Reaktion auf unterschiedliche Bodenfeuchtwerte. Wird dieser Grenzwert jedoch überschritten, kommt es zu einem starken fast senkrechten Anstieg der Abflussreaktion. Im Gegensatz dazu, ist die Abflussreaktion der Lauter (C) maßgeblich von der Niederschlagsintensität abhängig. Die Vorfeuchte spielt nur bei sehr hohen Abflusskoeffizienten eine kleine, aber trotzdem untergeordnete Rolle. Die Abflussreaktion an der Stunzach (A) und am Giebach (C) zeigen keine eindeutig Abhängigkeit von der Vorfeuchte oder der Intensität des Niederschlags. An der Stunzach scheint die Reaktion fast linear, d.h. je höher die Niederschlagsintensität oder die Vorfeuchte, desto höher die Abflussreaktion. Nicht ganz so eindeutig ist dies am Giebach zu sehen, hier ist ab einer gewissen Intensität von ca. 10 mm/h kein weiterer Anstieg zu verzeichnen.

Abbildung 23 zeigt die räumliche Verteilung der Sensitivitätsfaktoren. Sensitivitätsfaktoren über eins signalisieren eine starke Abhängigkeit der Abflussbildung von der Niederschlagsintensität. Einzugsgebiete, in denen die Vorfeuchte eine bedeutende Rolle spielt, haben hingegen Sensitivitätsfaktoren kleiner eins. Räumlich tendieren Einzugsgebiete im Norden und Westen Baden-Württembergs zu niedrigen Sensitivitätsfaktoren. Dagegen weisen Gebiete im Osten und in der Mitte Baden-Württembergs meist hohe Faktoren auf. Insgesamt sind die Sensitivitätsfaktoren mit einem Mittelwert von 0,95 sehr ausgeglichen. Das Minimum von 0,55 wurde an der Schutter in Wittenbach am westlichen Schwarzwaldrand und das Maximum von 1,37 in Maria Tann an der Kirchnach auf der Schwäbischen Alb bestimmt. An sieben von 65 Einzugsgebieten konnte keine RF-Regression trainiert werden, die eine erklärte Varianz über 50 % erreicht. Für diese Gebiete sind die Einzugsgebietsgrenzen als gestrichelte Linie in Abbildung 23 eingezeichnet.

In Abbildung 24 ist die absolute Differenz der Sensitivitätsfaktoren der RF-Regressionen von RoGeR abgebildet. Besonders in Einzugsgebieten im und am Rande des Nordschwarzwaldes weichen die Werte aus RoGeR von denen der empirischen Sensitivitäten stark ab. Die Differenzen sind in Einzugsgebieten, die sensitiv auf die Vorfeuchte sind im Allgemeinen höher als in denen, die sensitiv auf den Niederschlag sind (Abbildung 23). Im Mittel ist die Differenz der Sensitivitätsfaktoren von RoGeR und der RF-Regressionen 0,34, mit einem Maximum von 0,57 im Einzugsgebiet der Umlach bei Ummendorf im Osten und mit einem Minimum von $2 \cdot 10^{-3}$ im Gebiet des Brotenaubachs in Brotenau im Nordwesten Baden-Württembergs.

Die drei schnellen Abflusskomponenten HOF, SOF und ZA und die Summe aus den drei Abflussprozessen sind in Abbildung 25 auf Basis der verschiedenen RoGeR-Szenarien skizziert. Im Abbildungsabschnitt (A) ist das Einzugsgebiet der Rench im

Nordschwarzwald abgebildet. In diesem Gebiet ist bei den Szenarien 5, 6, 10 und 12 ZA die dominierende Komponente. Der Vergleich von Szenarien 11 ($40 \text{ mm}/24 \text{ h}$ Niederschlag und trockene Bodenbedingungen) und 12 ($40 \text{ mm}/24 \text{ h}$ Niederschlag und feuchte Bodenbedingungen) zeigt die Abhängigkeit der Vorfeuchte auf den ZA. Bei trockenen Bedingungen und einem 24h Niederschlagsereignis wurde kein ZA simuliert. In den anderen drei ausgewählten Einzugsgebieten spielen die anderen beiden Abflusskomponenten die entscheidende Rolle und es kommt bei keinem Szenario zu ZA. In den Einzugsgebieten der Lauter (B) und des Billinger Baches (C) ist besonders deutlich der Einfluss von HOF auf die Abflussbildung zu sehen. Bis auf einen geringen Anteil von SOF besteht der Abfluss fast zu hundert Prozent aus HOF. Im Einzugsgebiet der Wurzacher Ach (B) ist HOF bei Niederschlagsereignissen von einer Stunde mit den hohen Intensitäten die dominierende Größe. Bei den 24 h Niederschlagsszenarien ist SOF die dominante Komponente und HOF tritt zwar auf, nimmt aber mit steigenden Niederschlägen und/oder unterschiedlichen Vorfeuchtwerten nicht zu.

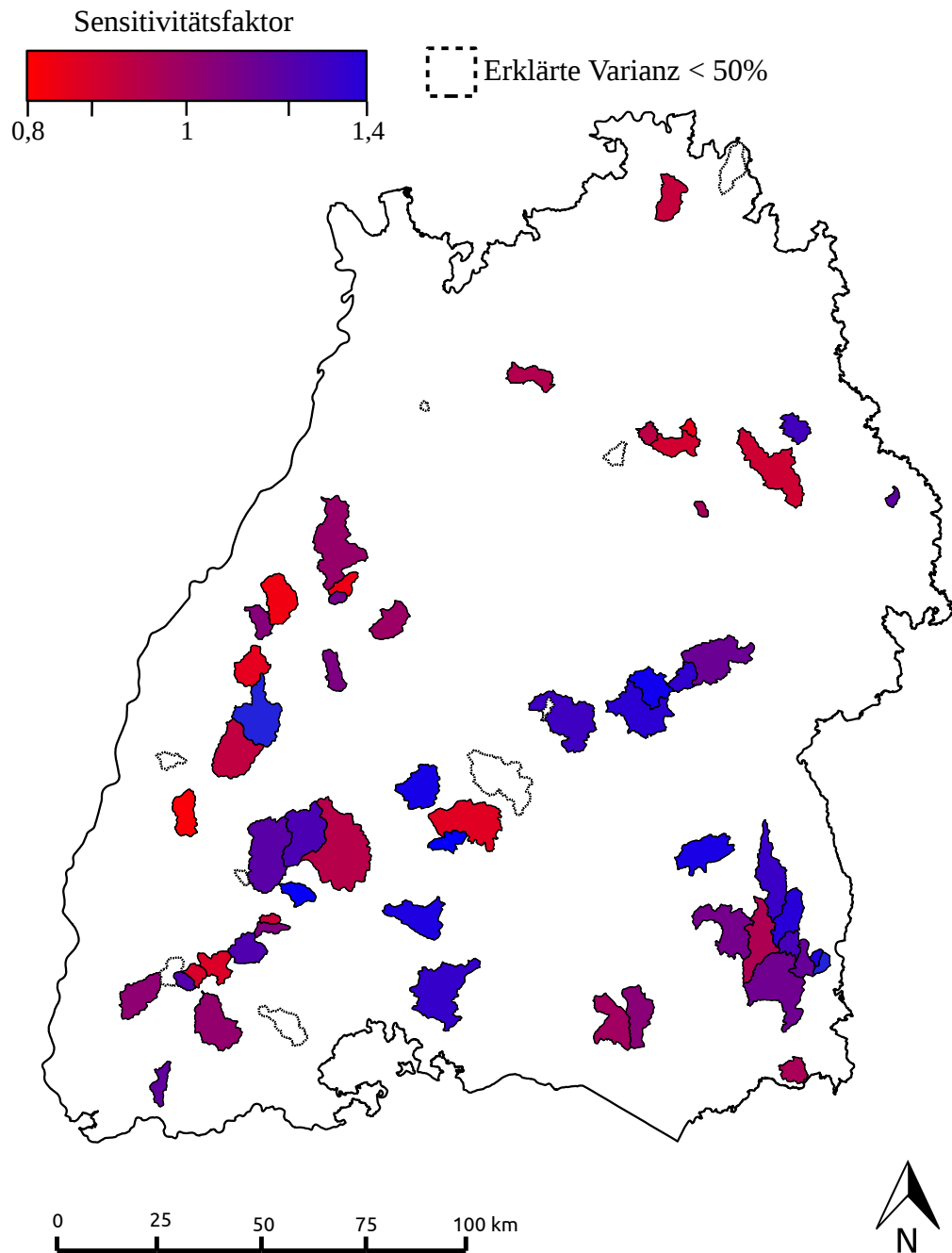


Abbildung 23: Einzugsgebiete in Baden-Württemberg und ihre Sensitivität auf die Vorfeuchte und Niederschlagsintensität bei der Abflussbildung (Sensitivitätsfaktor). Werte über eins kennzeichnen Einzugsgebiete die besonders sensitiv auf die Intensität des Niederschlags reagieren und in Gebieten mit Werten unter eins spielt die Vorfeuchte die dominierende Rolle bei der Abflussreaktion. Bei den farblosen gestrichelten Einzugsgebiete konnte keine zufriedenstellende (erklärte Varianz < 50 %) RF-Regression trainiert werden.

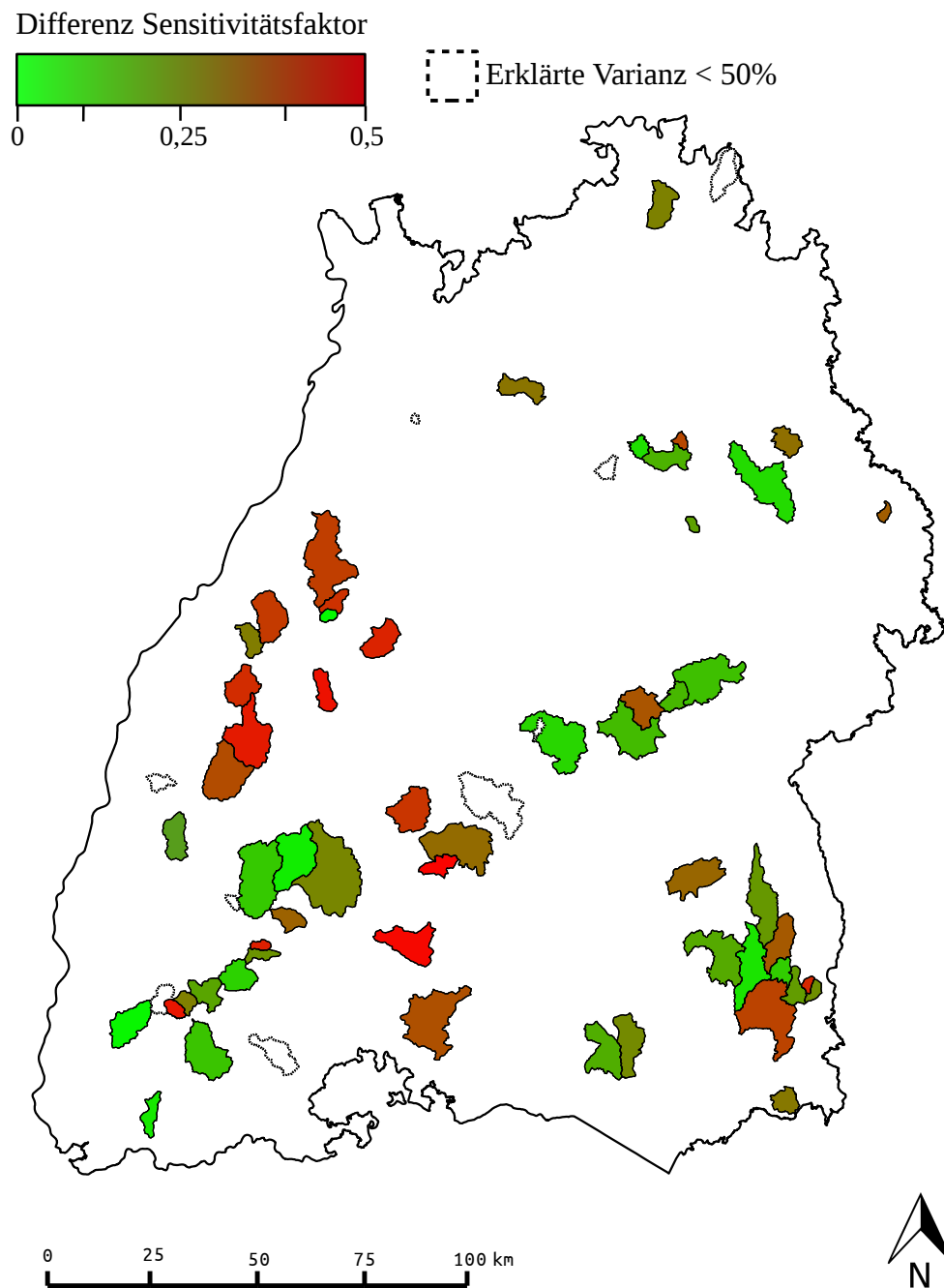


Abbildung 24: Absolute Differenz zwischen den Sensitivitätsfaktoren der RF-Regression und von RoGeR. Einzugsgebiete am Nordrand des Schwarzwaldes und im Südosten weisen hohe Abweichungen auf. Bei den farblosen gestrichelten Einzugsgebiete konnte keine zufriedenstellende (erklärte Varianz < 50 %) RF-Regression angenähert werden.

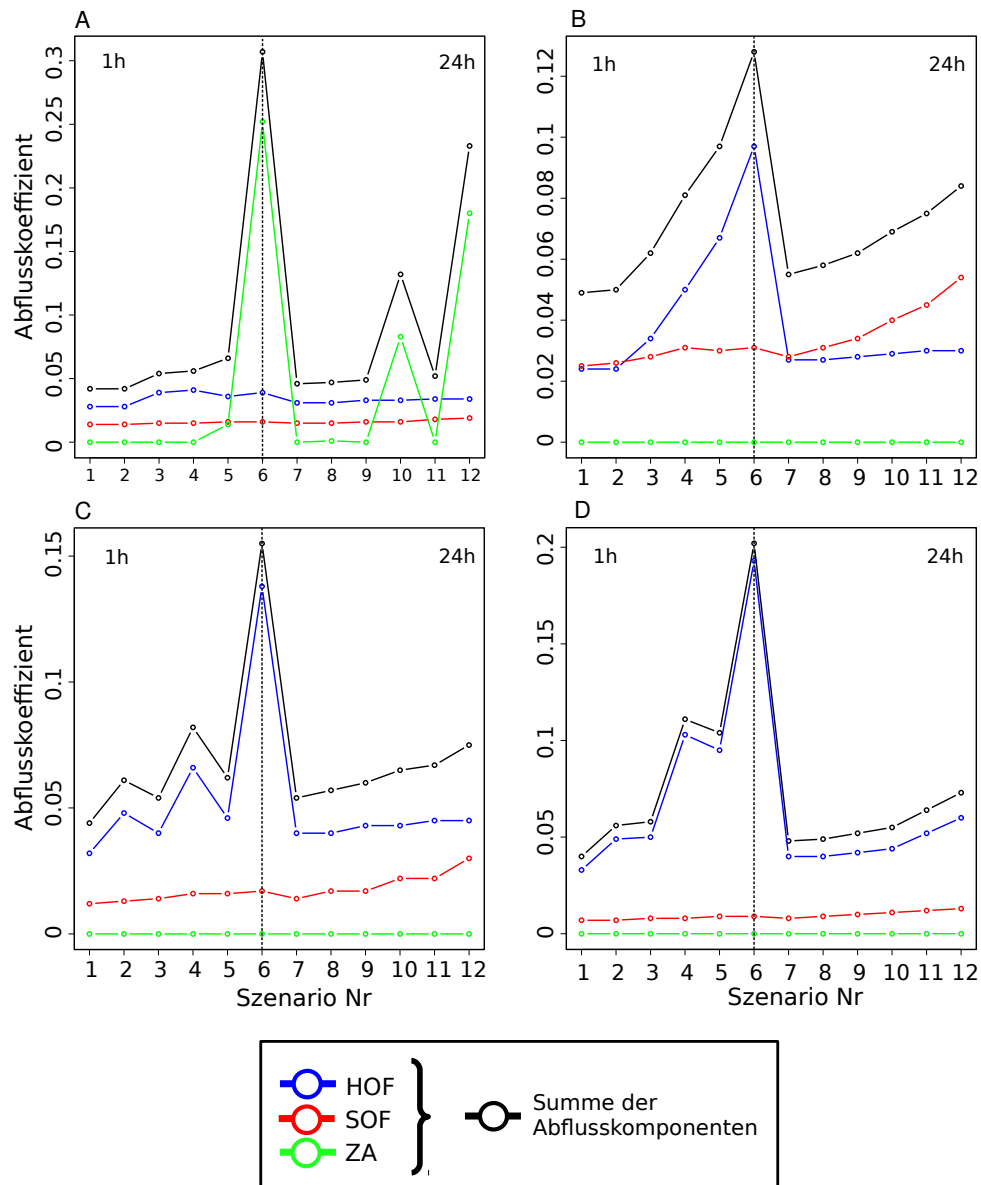


Abbildung 25: Anteil der drei schnellen Abflusskomponenten HOF, SOF und ZA an der Abflussbildung. Als Basis dienen die 12 RoGeR-Szenarien aus Tabelle 2. Es wurden exemplarisch vier Einzugsgebiete ausgewählt. In Abschnitt A ist die Rench (Ramsbach), in B die Wurzacher Ach (Reichenhofen), in C der Billinger Bach (Heilbronn) und in D die Lauter / Unterlenningen. Die Grafikabschnitte sind jeweils in die einstündige und 24-stündigen Szenarien durch eine gestrichelte horizontale Linie eingeteilt.

5 | Diskussion

5.1 Verteilung der Abflusskoeffizienten

Die Ergebnisse der automatischen Ereignisselektion zeigen, dass es relativ große regionale Unterschiede bei den Verteilungen der Abflusskoeffizienten in Baden-Württemberg gibt (Abbildung 11). Gebiete, die durch einen hohen durchschnittlichen Abflusskoeffizienten gekennzeichnet sind, sind meist auch gleichzeitig regelmäßig verteilt und besitzen niedrige Variationskoeffizienten (Abbildung 8). Dadurch ist die Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss deutlich linearer als dies in Einzugsgebieten mit niedrigen mittleren Abflusskoeffizienten der Fall ist.

Der Giebach repräsentiert exemplarisch ein Einzugsgebiet mit einem hohen mittleren Abflusskoeffizienten (Abbildung 10). Hohe Gebietsniederschläge werden fast immer linear im Direktabfluss widergespiegelt ($R^2=68,59\%$). Im Gegensatz dazu ist das Einzugsgebiet des Billinger Bachs ein Beispiel für einen sehr niedrigen mittleren Abflusskoeffizienten. Trotz der großen Variation der Niederschläge im Bereich von 10 bis 43 mm besitzen 64, der dort ausgewählten 66 Ereignisse einen deutlich kleineren Abflusskoeffizienten als 0,1. Daraus ergibt sich ein sehr schwacher linearer Zusammenhang zwischen Niederschlagshöhe und Abflussreaktion von $R^2=17,47\%$. Des weiteren ist die Verteilung stark linksschief. Dies wird besonders anhand von zwei Extremereignissen mit Abflusskoeffizienten von über 0,25 deutlich. Die beiden Ereignisse bewegen sich mit einem Niederschlag von 15,9 und 23,4 mm im mittleren Niederschlagsbereich, während die maximalen Abflüsse mit $5,98 \text{ m}^3/\text{s}$ und $4,76 \text{ m}^3/\text{s}$ zu den vier höchsten im Untersuchungszeitraum zählen (Abbildung 9). Die Abflusskoeffizienten bei diesen Events sind damit deutlich höher, da mehr als doppelt soviel Niederschlag wie üblich zum Abfluss gelangt.

Zusammenfassend tendieren Einzugsgebiete mit niedrigen mittleren Abflusskoeffizienten dazu, auf Niederschlagsereignisse nicht linear zu reagieren. Diese untypischen Abflussreaktionen lassen sich mittels klassischer auf den Abfluss kalibrierter Niederschlags-Abflussmodelle schwierig vorhersagen, da die Mehrheit der Ereignisse eine deutlich andere Abflusscharakteristik aufweist (BEVEN, 2011). Die automatische Ereignisselektion kann dazu genutzt werden, diese kritischen Einzugsgebiete hervorzuheben und damit Unsicherheiten in Modellierungen aufzuzeigen.

5.2 Die automatischen Ereignisselektion

MERZ & BLÖSCHL (2009) untersuchten 337 Einzugsgebiete in Österreich auf den Zusammenhang zwischen Abflusskoeffizienten und physikalischen Einzugsgebietseigenschaften. In ihrer Studie wurde, wie in dieser Arbeit (I), eine automatische Ereignisselektion angewendet, (II) die statistischen Momente der Abflusskoeffizienten bestimmt und (III) diese mit den Einzugsgebietsparametern korreliert. Die Auswertung zeigte eine starke Abhängigkeit der klimatische und topographische Parameter mit den Momenten der Verteilungen. Im Gegensatz dazu waren die Zusammenhänge zwischen den Verteilungen der Abflusskoeffizienten und den Boden- und Landnutzungsparametern nur sehr schwach ausgeprägt. Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangten auch NORBIATO et al. (2009), der die Methode von MERZ & BLÖSCHL (2009) in 14 alpinen Einzugsgebieten in den italienischen Alpen anwendete.

Auch in dieser Studie sind die starken Abhängigkeiten zwischen den klimatischen und topographischen Parametern mit den mittleren Abflusskoeffizienten, wie bei MERZ & BLÖSCHL (2009) oder bei NORBIATO et al. (2009), hervorzuheben (Tabelle 4). Darüber hinaus zeigen die Korrelationen zwischen den Mittelwerten, den Schiefen und den Variationskoeffizienten der Abflusskoeffizienten die selben Muster (Abbildung 8). Die Erkenntnis von NAEF (1993), Abflusskoeffizienten seien auf Grund der komplexen Einzugsgebietszustände als zufällige Nummer zu behandeln, wird als Folge der gefundenen Übereinstimmungen abgelehnt. Auch die Behauptung von CERDAN et al. (2004), Abflusskoeffizienten würden mit zunehmender Einzugsgebietsgröße abnehmen, konnte durch die schwache und nicht signifikante Korrelation der Einzugsgebietsfläche mit den mittleren Abflusskoeffizienten weder von MERZ & BLÖSCHL (2009) oder von NORBIATO et al. (2009) noch von dieser Studie bestätigt werden (Tabelle 4).

Verschiedene Arten der Abflussganglinienseparation in Basis- und Direktabfluss mit anschließender Berechnung des Abflusskoeffizienten in unterschiedlichen Einzugsgebieten in Süd-Chile wurden von BLUME et al. (2007) verglichen. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass die verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Abflussbeiwerts keinen methodenübergreifenden Vergleich zulassen, weil die Ergebnisse zu stark voneinander abweichen. Es ist daher aufschlussreich, dass sowohl MERZ & BLÖSCHL (2009) wie auch NORBIATO et al. (2009) eine andere automatische Ereignisselektion zur Bestimmung der Abflussbeiwerte verwendeten, als die in dieser Studie Angewandte. Ein direkter Vergleich der einzelnen Abflusskoeffizienten ist angesichts der unterschiedlichen Datensätze, die verwendet wurden, nicht möglich. Die gefundenen Abhängigkeiten sind jedoch so ähnlich, dass ein Vergleich der Ab-

flusscharakteristik, also der Vergleich der Verteilungen der Abflusskoeffizienten, als gerechtfertigt scheint.

Die gefundenen Zusammenhänge und Vergleiche mit anderen Studien ergeben, dass die hier entwickelte automatische Ereignisselektion mit der von MERZ et al. (2006) gleichwertig ist. Eine direkte Validierung der Methode ist wegen der Menge von ausgewählten Ereignisse (5250) rein visuell kaum möglich. Hinzu kommt die Tatsache, dass selbst bei einer manuellen Validierung verschiedene Bearbeiter zu verschiedenen Resultaten gelangen würden (DUNNE, 1978). Andere Methoden wie Tracerversuche, die die realistischsten Ergebnisse liefern würden, sind nur in sehr kleinem Umfang möglich und damit im Rahmen dieser Arbeit nicht geeignet, um eine automatische Ereignisselektion zu testen (TALLAKSEN 1995; HOEG et al. 2000; LADOUCHE et al. 2001). Infolge der Übereinstimmung der Ergebnisse und Muster mit anderen Studien und der stichprobenartigen visuellen Überprüfungen ist davon auszugehen, dass sie ein geeignetes Mittel zur automatischen Bestimmung von Abflusscharakteristiken und Koeffizienten in unterschiedlichen Einzugsgebieten ist. Zudem ist sie durch die Verwendung der konstanten k-Methode teilweise physikalisch basiert (BLUME et al., 2007).

5.3 Abflussbildung in RoGeR

Mittlere Fehler von ca. 10 % sind bei Niederschlagsmessungen in Einzugsgebieten nicht ungewöhnlich (RICHTER, 1995). Für ein Abflussevent mit einem Abflusskoeffizienten von 0,2 ergeben sich so bereits mögliche Variationen von 0,18 bis 0,22. Hinzu kommen Unsicherheiten in der Abflussmessung und in der Ereignisselektion, die aber nicht oder nur schlecht quantifizierbar sind (DUNNE, 1978). Auf Grund dieser Unsicherheiten wurden von RoGeR simulierte Einzugsgebiete, die einen RM-SE kleiner 0,05 besitzen, als zufriedenstellend modelliert eingestuft (Abbildung 15). Zufriedenstellend bedeutet in diesem Fall, dass die Abflusscharakteristik eines Einzugsgebietes von RoGeR reproduziert werden konnte und damit die Prozesse in der Summe quantitativ wiedergegeben werden konnten. Eine zufriedenstellende Modellierung konnte in 30 Einzugsgebieten und damit in fast 50 % der Untersuchungsregion erzielt werden. Vergleicht man dies mit Regionalisierungsstudien, in denen versucht wurde, konzeptionelle Modelle auf unbemessene Einzugsgebiete zu übertragen, ist dies für ein Modell, dessen Hauptfokus nicht auf der quantitativen Wiedergabe des Abflusses liegt, ein respektables Ergebnis (WAGENER et al. 2004; PARAJKA et al. 2007; WAGENER & MONTANARI 2011).

Im direkten Vergleich mit den RF-Regressionen, die den α und β Verteilungspara-

meter eines Einzugsgebietes abschätzen, schneidet das Modell RoGeR geringfügig schlechter ab (Abbildung 18). Die beiden Regressionen wurden allerdings anhand eines sehr großen Datensatzes mit 50 % der Einzugsgebiete trainiert, um diese geringen Abweichungen zu erzielen. Bei einer praktischen Anwendung müssten für 32 Einzugsgebiete von 65 Gebieten Abflussdaten und Niederschlagsdaten vorliegen, um daraus die Abflusscharakteristiken zu bestimmen. RoGeR dagegen benötigt keinerlei Informationen über den Abfluss und kann, wenn flächenhafte Geodaten vorliegen, theoretisch überall eingesetzt werden (WABOA, 2007). Letztendlich sind RF-Regressionen durch ihren Aufbau aus vielen hunderten bis tausenden Regressionsbäumen nur schwer interpretierbar (PRASAD et al., 2006). Es bestehen Möglichkeiten die einflussreichsten Vorhersageparameter zu identifizieren. Quantitative Aussagen, das Testen von Hypothesen oder ein Verständnisgewinn über hydrologische Prozesse können dagegen nur in sehr geringen Umfang und mit großen Unsicherheiten getroffen werden.

Trotz der Schwächen zeigen die signifikanten Abhängigkeiten zwischen den RMSE von RoGeR und der der RF-Regressionen (Abbildung 18), dass dieselben zehn Einzugsgebiete sowohl von RoGeR, wie auch von den RF-Regressionen nicht zufriedenstellend simuliert wurden ($RMSE > 0,15$). Die Abflussbildung in diesen Einzugsgebieten kann deshalb weder von den modellierten Prozessen und Speichern in RoGeR noch von den Einzugsgebietsparametern in Kombination mit den RF-Regressionen wiedergeben werden. Beachtenswert daran ist, dass RoGeR und die RF-Regressionen auf unterschiedlichen Datensätzen basieren und darüber hinaus auf einer verschiedenen Herangehensweisen gründen. In beiden Fällen sind die Datensätze aus dem WABOA (2007) extrahiert. Im Fall der RF-Regressionen wurden sie allerdings stark klassifiziert und auf Prozentanteile an der Einzugsgebietsfläche heruntergebrochen.

Aufschlussreich ist, dass vor allem Einzugsgebiete, für die hohe prozentuale Zwischenabflussanteile simuliert wurden, besonders starke Abweichungen von den empirischen Daten aufweisen, da durchgängig zu wenig Abfluss simuliert wurde (Abbildung 19). Zahlreiche Studien zeigen den Zwischenabfluss als einen, der am schwersten vorherzusagenden schnellen Abflusskomponenten auf (SCHERRER & NAEF 2003; WEILER 2005; SCHERRER & NAEF 2007; ANDERSON et al. 2009; BACHMAIR & WEILER 2012). Während HOF maßgeblich durch die Infiltrationskapazität des Bodens gesteuert wird und SOF durch die Höhe des zur Verfügung stehenden Speicherpotentials im Boden, sind die Einflussfaktoren bei Zwischenabfluss komplex und noch immer Gegenstand aktueller Forschung (BACHMAIR & WEILER, 2011). Auch in dieser Studie scheinen die verwendeten Einzugsgebietsparameter der RF-

Regressionen sowie die Modellstruktur von RoGeR die Abflussbildung in zwischenabflussdominierten Einzugsgebieten nur unzureichend wiederzugeben. In der Modellstruktur könnten die Schwächen im Fehlen von ZA an pedogenen Schichtgrenzen, an nicht vorhandenen Grenzwerten für die Konnektivität von abflussrelevanten Flächen, oder am Auftreten von Zwischenabfluss in Solifluktionsschuttdecken liegen. Diese Prozesse und Daten sind noch nicht in RoGeR implementiert, da die Informationen in Baden-Württemberg in der Vergangenheit nicht flächenhaft zur Verfügung standen oder nicht existieren.

5.4 'Random Forests' mit zusätzlichen Parametern

Die Abweichungen der RF-Regressionen und der RoGeR-Simulationen von den empirischen Abflusskoeffizienten hängen stark voneinander ab (Abbildung 18). Deshalb wurde die Annahme getroffen, dass eine Verbesserung der RF-Regressionen durch das Hinzufügen von neuen Gebietsparametern auch Hinweise zur Optimierung von RoGeR geben kann. Diese Herangehensweise bietet eine schnelle Möglichkeit neue Einzugsgebietsparameter auf ihren hydrologischen Informationsgehalt hin zu testen. Es ist ein Vorteil, da die direkte Implementierung in RoGeR deutlich arbeitsaufwendiger wäre.

Die neu extrahierten Parameter wurden mit Fokus auf den ZA ausgewählt. Sie optimierten die Regression aber nur unwesentlich (Abbildung 20). In Abbildung 21 wird deutlich, dass 'B_10%', 'B_90%' und der 'kf-Parameter' einen sehr geringen Einfluss auf das Regressionsergebnis haben. Besonders die RF-Regression, welche den β -Parameter abschätzt, konnte im Hinblick auf die erklärte Varianz nicht verbessert werden. Der Grund hierfür könnte sein, dass die Höhe des β -Parameters maßgeblich die Linksschiefe der Verteilung bestimmt, und damit besonders für trockene Einzugsgebiete, im Bezug auf die mittlere jährliche Niederschlagssumme, entscheidend ist (MERZ et al., 2006). In diesen Einzugsgebieten hat der ZA tendenziell einen geringen Beitrag zur Abflussbildung, was den fehlenden Einfluss auf die β -RF-Regression erklären kann (Tabelle 5). Im Gegenzug dazu konnte die Modellgüte der α -RF-Regression mit dem neu extrahierten 'kf-Parameter' leicht verbessert werden. Das Verhältnis zwischen α und β Parameter bestimmt die Rechtsschiefe der Verteilung und ist damit in Einzugsgebieten mit hohen mittleren Abflusskoeffizienten, bei denen ZA häufig eine dominierende Abflusskomponente ist, ausschlaggebend. Deshalb könnte die Implementierung der Geodaten in RoGeR, aus denen der 'kf'-Parameter abgeleitet wurde, die Modelleffizienz in zwischenabflussdominierten

Einzugsgebieten optimieren.

Insgesamt bleibt der Einfluss der neuen Parameter auf die RF-Regression aber schwach und die Suche nach hydrologischen Parametern, die die dominanten Einzugsgebietsprozesse besser wiedergeben, bleibt bestehen (GRAYSON & BLÖSCHL 2001; SIVAKUMAR 2004). Diese Einzugsgebietsparameter sollten sowohl die Funktion als auch die Reaktion eines Einzugsgebiets beschreiben (WAGENER et al. 2007; McDONNELL & WOODS 2004). Tatsächlich bestehen in der Hydrologie aber Zweifel, ob aus Ähnlichkeiten bei physikalischen Einzugsgebietseigenschaften auch immer auf Ähnlichkeiten beim hydrologischen Verhalten geschlossen werden kann (OUDIN et al., 2010). Prozessorientierte Modelle wie RoGeR, in denen physikalische Parameter mit hydrologischen Prozessen kombiniert werden, bieten deshalb eine gute Basis, um Hypothesen über die Abflussbildung in Einzugsgebieten zu testen und besser zu verstehen.

5.5 'Random Forests' in der Hydrologie'

Die Verwendung von 'Random Forests' in der Hydrologie ist noch nicht weit verbreitet. Während andere maschinelle Lernalgorithmen, wie künstliche neuronale Netzwerke (ANN) schon seit geraumer Zeit in der Hydrologie eingesetzt werden (ASCE, 2000), sind dem Autor nur wenige hydrologische Studien bekannt, in denen RF Einsatz finden (BACHMAIR & WEILER 2012; BAUDRON et al. 2013). Im Gegensatz dazu sind sie in der Biologie und Fernerkundung bereits seit längerem Bestandteil von unterschiedlichen Klassifikations- und Regionalisierungsstudien (PRASAD et al. 2006; GISLASON et al. 2006; PETERS et al. 2007; CUTLER et al. 2007; CHAN & PAELINCKX 2008; ARCHER & KIMES 2008). Diese Studien zeigen, dass RF auch dann gute Ergebnisse erzielen, wenn traditionelle statistische Methoden komplexe Muster und Zusammenhänge nicht wiedergeben können (BAUDRON et al., 2013). Die Anwendung von RF-Regressionen bietet sich an, wenn die Vorhersageparameter und die Zielparameter bzw. die zu klassifizierenden Elemente stark voneinander abhängen und die Beziehungen komplex und nichtlinear sind.

Bei vielen hydrologischen Fragestellungen ist genau dies der Fall. Grenzwertverhalten und komplexe Zusammenhänge erschweren das Beschreiben und Analysieren von hydrologischen Prozessen. Auch in dieser Studie bestimmen die Abhängigkeiten und Interaktionen zwischen den vier Ereignisbedingungen Dauer, Vorfeuchte, Niederschlagssumme und Intensität maßgeblich die Abflussreaktion. Wie in Abbildung 22 gesehen werden kann, sind diese Beziehungen bereits für zwei variierende Parameter vielschichtig und in jedem Einzugsgebiet einzigartig. Ebenso sind die Zusammen-

hänge zwischen physikalischen Einzugsgebietseigenschaften und der Abflusscharakteristik nicht linear und die Erkenntnisse, die mittels klassischer Statistik gemacht werden können, nur begrenzt aussagekräftig (MERZ & BLÖSCHL 2009; NORBIATO et al. 2009). Deshalb wurden in dieser Arbeit mehrfach RF-Regressionen gegenüber klassischen statistischen Regressionsmethoden bevorzugt.

Der entscheidende Nachteil aller maschineller Lernalgorithmen inklusive ANN oder RF ist jedoch, dass Ergebnisse nicht direkt durch mathematische Formeln repräsentierbar sind und statistische Standardverfahren wie Hypothesentests, die Berechnung von Regressionskoeffizienten oder p-Werten nicht möglich sind. Es bestehen verschiedene Optionen die einflussreichsten Modellparameter und die Modellgüte abzuschätzen. Allerdings sind die Methoden immer noch in der Entwicklung und in Diskussion (STROBL et al., 2009). Zudem ist die Auswertung dieser Verfahren im Moment weder quantitativ noch modellübergreifend möglich (CUTLER et al., 2007). Trotzdem bleibt es ein Vorteil von RF Strukturen in mehrdimensionalen Datensätzen zu erkennen und im Allgemeinen dort mit wenig Abstimmung bemerkenswert gute Ergebnisse erzielen zu können, wo klassische Ansätze versagen (HASTIE et al., 2009).

5.6 Abflussbildung in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität

Die verschiedenen Abflussreaktionen in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität konnten exemplarisch für vier Einzugsgebiete in Abbildung 22 dargestellt werden. Es ist bemerkenswert, dass TRAMBLAY et al. (2010) die Bodenfeuchte am Anfang eines Ereignisses als eine der entscheidenden Größen beschreibt, um die Abflussreaktion eines hydrologischen Systems vorherzusagen. Im Gegensatz dazu zeigten KOSTKA & HOLKO (2002), dass in den von ihnen untersuchten Gebieten das Abflussverhalten relativ insensitiv gegenüber der Vorfeuchte ist und maßgeblich von der Niederschlagscharakteristik gesteuert wird. In dieser Arbeit konnten sowohl Einzugsgebiete gefunden werden, die besonders stark auf unterschiedliche Vorfeuchten reagierten, als auch Einzugsgebiete, in denen verschiedene Bodenfeuchten kaum eine Änderung der Abflussreaktion verursachten. Im Bundesland Baden-Württemberg sind etwa die Hälfte der Einzugsgebiete sensitiv auf die Vorfeuchte und die andere Hälfte sensitiv auf die Niederschlagsintensität (Abbildung 23). Besonders deutlich sind die Unterschiede bei der Abflussbildung zwischen dem Billinger Bach und der Lauter (Abbildung 22). Während die Lauter besonders stark auf die Niederschlag-

sintensität reagiert, ist die Abflussbildung am Billinger Bach maßgeblich von der Vorfeuchte abhängig. Die beiden Sensitivitätsfaktoren von 1,27 an der Lauter und von 0,85 am Billinger Bach bestätigen diesen Eindruck. Bei den meisten Einzugsgebieten ist diese Abhängigkeit nicht so eindeutig, wie es bei den oben genannten Beispielen der Fall ist. Der Großteil der Sensitivitätsflächen ist eher mit denen des Giebachs oder der Wurzacher Ach zu vergleichen (Abbildung 22). Allen ist aber gemeinsam, dass die Abflussbildung in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität komplex und nichtlinear ist.

Dass hydrologische Prozesse in der Realität keineswegs linear und zusätzlich stark durch Grenzwertverhalten geprägt sind, deckt sich mit den Erkenntnissen von BLÖSCHL & ZEHE (2005) und ZEHE et al. (2007). Dabei versteht man unter einem Grenzwertverhalten eine abrupte Änderung in der Systemdynamik in einer Zeitspanne, die deutlich kürzer ist, als in einem System üblich (PITMAN & STOUFFER, 2006). Solche abrupten Änderungen im hydrologischen Verhalten können z.B. durch die Konnektivität von abflussrelevanten Flächen (ZA), durch die Überschreitung der Infiltrationskapazität (HOF) oder durch das Erreichen der maximalen Speicherkapazität des Bodens (SOF) erreicht werden (BACHMAIR & WEILER, 2011). Genau diese Grenzwerte und Zusammenhänge können mit den entwickelten Sensitivitätsflächen visualisiert und anschließend mit dem Sensitivitätsfaktor räumlich verglichen werden. Es ist erwähnenswert, dass die Sensitivitätsfaktoren zwar einer gewissen räumlichen Ordnung folgen, jedoch immer wieder nebeneinander liegende Einzugsgebiete entweder auf die Vorfeuchte oder auf die Niederschlagsintensität sensitiv sind. In Regionen, wie im Osten Baden-Württembergs, in denen sich die physikalischen Eigenschaften der Einzugsgebiete räumlich schnell ändern, ist das nachvollziehbar, in anderen Regionen weniger. Das zeigt, dass Ähnlichkeiten bei klassischen Einzugsgebietsparametern wie der Geologie, des Bodens oder Landnutzungsform nicht immer auch Ähnlichkeiten in der hydrologischen Reaktion bedeuten (OUDIN et al., 2010). Dies könnte ein zusätzlicher Grund sein, weshalb klassische Regionalisierungsansätze neben der Äquifinalität von Modellparametern (BEVEN & FREER 2001; BEVEN 2006) häufig bei den Versuchen scheitern, Modelle auf physikalisch ähnliche Einzugsgebiete zu übertragen (PARAJKA et al. 2005; WAGENER & WHEATER 2006; PARAJKA et al. 2007).

In RoGeR dagegen werden alle Parameter von flächendeckenden Geodaten abgeleitet. Das Modell benötigt keine Kalibrierung an Abflussdaten. Überdies wurde es entwickelt, um Abflussbildungsprozesse für verschiedene Ereignisbedingungen (Niederschlagstypen, Niederschlagshöhen, Vorfeuchte und Vegetationszustand) in den unterschiedlichen Naturräumen Baden-Württembergs zu quantifizieren. Da das Auf-

treten der unterschiedlichen Abflusskomponenten in einem hydrologischen System neben den physikalischen Begebenheiten maßgeblich von den Niederschlags- und Bodenfeuchtebedingungen abhängt (SCHERRER & NAEF, 2003), sollte RoGeR diese Abhängigkeiten auch wiedergeben können. Einzugsgebiete in denen HOF zu den dominanten Abflusskomponenten gehört, müssten sensitiv auf die Niederschlagsintensität sein. Im Gegensatz dazu sollten Einzugsgebiete die, ZA oder SOF dominiert sind, eine hohe Abhängigkeit von der Vorfeuchte aufweisen. Für die Lauter bei Unterlenning wurde ein Sensitivitätsfaktor von 1,27 bestimmt. Das Einzugsgebiet ist damit stark sensitiv auf die Niederschlagsintensität. RoGeR simuliert aus hydrologischer Sicht passend für dieses Einzugsgebiet fast ausschließlich HOF. Nur der, aus den RoGeR-Daten berechnete Sensitivitätsfaktor weicht relativ stark um 0,28 Punkte vom empirischen Sensitivitätsfaktor ab. Das Einzugsgebiet der Rench, mit einem Sensitivitätsfaktor von 0,58, ist damit sensitiv auf die Vorfeuchte und wurde von RoGeR bei den Szenarien mit höheren Niederschlagssummen und Intensitäten korrekt als ZA dominiert simuliert. Die Differenz der Sensitivitätsfaktoren ist aber auch hier mit 0,38 sehr hoch. An der Wurzacher Ach wurde ein Sensitivitätsfaktor von 1,02 bestimmt. Die Abflussbildung im Einzugsgebiet ist im selben Maße sensitiv auf die Vorfeuchte wie auf die Niederschlagsintensität. RoGeR kann auch dieses Verhalten wiedergeben und simuliert Szenarien mit einer Dauer von 1 h und hohen Niederschlagsintensität als HOF dominiert und Szenarien mit einer Niederschlagsdauer von 24 h dagegen als SOF dominiert. Jedoch ist die Abweichung des RoGeR-Sensitivitätsfaktors mit einer Differenz von 0,31 erneut sehr hoch (Abbildung 24 & 25).

Zusammenfassend scheint es, als ob RoGeR die Charakteristik der Abflusskomponenten nach hydrologischem Prozessverständnis richtig wiedergibt. Der speziell für RoGeR entwickelte Sensitivitätsfaktor aber kein geeignetes Mittel ist, um die Ergebnisse mit den empirischen Sensitivitätsfaktoren zu vergleichen.

6 | Schlussfolgerungen

Ziel der vorliegenden Studie war es, für 65 meso-skalierte Einzugsgebiete in Baden-Württemberg die Abflussbildung in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität zu bestimmen und zu analysieren. Zu diesem Zweck wurden für eine Vielzahl von Abflussereignissen Abflusskoeffizienten bestimmt. Diese Werte wurden mithilfe von Korrelationsanalysen und 'RF'-Regressionen auf Muster und Zusammenhänge mit den physikalischen Einzugsgebietsparametern untersucht und anschließend mit den simulierten Abflussszenarien aus dem Modell 'RoGeR' verglichen.

Die Untersuchung zeigte, dass die extrahierten Abflusskoeffizienten vor allem von klimatischen und topographischen Parametern abhängen, und die entwickelte automatische Ereignisselektion ein geeignetes Verfahren ist. Im Vergleich zu anderen Methoden zeigt sie einige Verbesserungen. Des Weiteren gibt das Modell 'RoGeR' in einem Großteil der Einzugsgebiete die Abflussbildung quantitativ korrekt wieder. In Einzugsgebieten, in denen der Zwischenabfluss eine dominante Rolle spielt, wird jedoch durchgängig zu wenig Abfluss am Pegel simuliert. Durch das Implementieren neuer Prozesse, wie das Fließen von Wasser an Horizontgrenzen im Boden oder durch das Hinzufügen von neuen Geodaten wie z.B. Informationen über Solifluktionsschuttdecken könnte das Modell 'RoGeR' möglicherweise optimiert werden. Die Sensitivitätsflächen der Abflussreaktion, die mithilfe von 'RF'-Regressionen und den Abflussereignisbedingungen wie Ereignisdauer, Vorfeuchte, Niederschlagssumme und Intensität generiert wurden, ermöglichen es, die Abflussbildung in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität zu vergleichen und für jedes Einzugsgebiet einen Sensitivitätsfaktor zu bestimmen. Auf dieser Grundlage konnte gezeigt werden, dass die Abflussreaktionen in Einzugsgebieten sehr unterschiedlich ausfallen können und selbst benachbarte Einzugsgebiete verschiedene Sensitivitäten im Hinblick auf die Vorfeuchte und die Niederschlagsintensität aufweisen können. Des Weiteren konnte mittels der Sensitivitätsflächen gezeigt werden, dass 'RoGeR' die einzelnen Abflussbildungskomponenten korrekt wiedergibt.

Zusammenfassend sind die neu entwickelten Sensitivitätsflächen ein geeignetes Mittel, um die Abflussbildung in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität in Einzugsgebieten zu beschreiben. Die verwendeten 'RF'-Regressionen erwiesen sich als äußerst flexibel. Das liegt vor allem daran, dass sie schnell an komplexe Datensätze angepasst werden können und auch fähig sind, nicht-lineare Zusammenhänge wiederzugeben. Deshalb konnte mit Hilfe der 'RF'-Regressionen dargestellt werden, dass 'RoGeR' in weiten Teilen Baden-Württembergs die Ab-

flussbildung und die Abflussbildungsprozesse korrekt wiedergeben kann. Für Zwischenabfluss dominierte Einzugsgebiete ist dies jedoch nicht der Fall. Die Analysen zeigten, dass die Hypothesen und konzeptionalisierten Prozesse die bis dato in 'RoGeR' implementiert wurden noch nicht komplett die Abflussbildung beschreiben können. Insgesamt simuliert das Modell allerdings schon heute das Auftreten der schnellen Abflussprozesse in Relation zueinander in den unterschiedlichen Einzugsgebieten korrekt. Zudem bietet es eine hervorragende Plattform an um neues Wissen aus hydrologischen Feldstudien von der Plot- oder Hangskala auf Einzugsgebietsebene zu regionalisieren und anschließend im Hinblick auf die Abflussbildung zu testen. Damit ist 'RoGeR' wie von SAVENIJE (2009) formuliert wurde kein Modell nach dem Schema 'Ein Modell für alles' sondern das richtige Modell für den richtigen Grund und zwar zur Erforschung und Konzeptionalisierung der Abflussbildung.

Literatur

- AMBRUSTER, V. (2002): *Grundwasserneubildung in Baden - Württemberg*. Freiburg Schriften zur Hydrologie, 17, p. 1–128
- ANDERSON, a. E., WEILER, M., ALILA, Y. & HUDSON, R. O. (2009): *Subsurface flow velocities in a hillslope with lateral preferential flow*. Water Resources Research, 45, No. 11, p. 1–128
- ARCHER, K. & KIMES, R. (2008): *Empirical characterization of random forest variable importance measures*. Computational Statistics & Data Analysis, 52, p. 2249–2260
- ASCE (2000): *Artificial Neural Networks in Hydrology. I: Preliminary Concepts*. Journal of Hydrologic Engineering, 5, No. 2, p. 115–123
- BACHMAIR, S. & WEILER, M. (2012): *Hillslope characteristics as controls of subsurface flow variability*. Hydrology and Earth System Sciences, 16, No. 10, p. 3699–3715
- BACHMAIR, S. & WEILER, M. (2011): *Forest Hydrology and Biogeochemistry*. Springer Netherlands, Dordrecht. – 455 pp.. – ISBN 978-94-007-1362-8
- BAUDRON, P., ALONSO-SARRÍA, F., GARCÍA-ARÓSTEGUI, J. L., CÁNOVAS-GARCÍA, F., MARTÍNEZ-VICENTE, D. & MORENO-BROTÓNS, J. (2013): *Identifying the origin of groundwater samples in a multi-layer aquifer system with Random Forest classification*. Journal of Hydrology, 499, p. 303–315
- BEST, D. (1975): *The upper tail probabilities of Spearman's rho*. Applied Statistics, 24, p. 377–379
- BEVEN, K. (1989): *Changing ideas in hydrology—the case of physically-based models*. Journal of hydrology, 105, p. 157–172
- BEVEN, K. (2000): *Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling*. Hydrology and Earth System Sciences, 4, No. 2, p. 203–213
- BEVEN, K. (2006): *A manifesto for the equifinality thesis*. Journal of Hydrology, 320, No. 1-2, p. 18–36
- BEVEN, K. (2011): *Rainfall-runoff modelling: the primer*. 2, WileyLibrary. – 12, 231 pp.. – ISBN 9780470714591
- BEVEN, K. & FREER, J. (2001): *Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology*. , 249, p. 11–29

-
- BEVEN, K., KIRKBY, M., SCHOFIELD, N. & TAGG, A. (1984): *Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments*. Journal of Hydrology, 69, No. 1, p. 119–142
- BLÖSCHL, G. & ZEHE, E. (2005): *On hydrological predictability*. Hydrological Processes, 19, No. 19, p. 3923–3929
- BLUME, T., ZEHE, E. & BRONSTERT, A. (2007): *Rainfall—runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation*. Hydrological Sciences Journal, 52, No. 5, p. 843–862
- BOWDEN, W. B., FAHEY, B. D., EKANAYAKE, J. & MURRAY, D. L. (2001): *Hillslope and wetland hydrodynamics in a tussock grassland, South Island, New Zealand*. Hydrological Processes, 15, No. 10, p. 1707–1730
- BREIMAN, L. (2001): *Random Forest*. Machine Learning, 45, No. 1, p. 1–35
- BREIMAN, L., FRIEDMAN, J. H., OLSHEN, R. A. & STONE, C. J. (1984): *Classification and regression trees*. Wadsworth & Brooks, No. 1, p. 18
- CERDAN, O., LE BISSONNAIS, Y., GOVERS, G., LECOMTE, V., OOST, K. van, COUTURIER, A., KING, C. & DUBREUIL, N. (2004): *Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy*. Journal of Hydrology, 299, No. 1-2, p. 4–14
- CHAMBERS, J. & HASTIE, T. (1991): *Statistical models in S*, CRC Press, Inc. – 95 pp.. – ISBN 0412830402
- CHAN, J. C.-W. & PAELINCKX, D. (2008): *Evaluation of Random Forest and Ada-boost tree-based ensemble classification and spectral band selection for ecotope mapping using airborne hyperspectral imagery*. Remote Sensing of Environment, 112, No. 6, p. 2999–3011
- CHAPMAN, T. (1999): *A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation*. Hydrological Processes, No. 1, p. 294–299
- CUTLER, D. R., EDWARDS, T. C., BEARD, K. H., CUTLER, A., HESS, K. T., GIBSON, J. & LAWLER, J. J. (2007): *Random forests for classification in ecology*. Ecology, 88, No. 11, p. 2783–92
- DÍAZ-URIARTE, R. & ALVAREZ DE ANDRÉS, S. (2006): *Gene selection and classification of microarray data using random forest*. BMC bioinformatics, 7, p. 3
- DUNNE, T. (1978): *Field studies of hillslope flow processes*. Hillslope Hydrology, 7, p. 227–293
- GISLASON, P. O., BENEDIKTSSON, J. A. & SVEINSSON, J. R. (2006): *Random Forests for land cover classification*. Pattern Recognition Letters, 27, No. 4, p. 294–300

-
- GOTTSCHALK, L. & WEINGARTNER, R. (1998): *Distribution of peak flow derived from a distribution of rainfall volume and runoff coefficient, and a unit hydrograph*. Journal of hydrology, 208, No. 3-4, p. 148–162
- GÖTZINGER, J. & BÁRDOSSY, A. (2007): *Comparison of four regionalisation methods for a distributed hydrological model*. Journal of Hydrology, 333, No. 2-4, p. 374–384
- GRAYSON, R. & BLÖSCHL, G. (2001): *Summary of pattern comparison and concluding remarks*. Spatial Patterns in Catchment Hydrology, 1, p. 355–367
- HÄCKEL, H. (2012): *Meteorologie*, UTP. – 124 pp.. – ISBN 3825213382
- HASTIE, T., TIBSHIRANI, R. & FRIEDMAN, J. (2009): *The elements of statistical learning*. Second Edi, Springer Verlag. – 587 pp.
- HOEG, S., UHLENBROOK, S. & LEIBUNDGUT, C. (2000): *Hydrograph separation in a mountainous catchment—combining hydrochemical and isotopic tracers*. Hydrological Processes, 14, p. 1199–1216
- KOSTKA, Z. & HOLKO, L. (2002): *Analysis of rainfall-runoff events in the mountain catchment*. , 2001, p. 1–4
- LADOUCHE, B., PROBST, A., VIVILLE, D. & IDIR, S. (2001): *Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches*. Journal of Hydrology, 242, p. 255–274
- LONGOBARDI, A. & VILLANI, P. (2003): *On the relationship between runoff coefficient and catchment initial conditions*. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 2, No. 1, p. 1–6
- MAURER, T. (1997): *Physikalisch begründete zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten.*, Karlsruher Institut für Technologie, PhD thesis, 1997. – 1 pp.
- MCDONNELL, J. J. (2003): *Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response*. Hydrological Processes, 17, No. 9, p. 1869–1875
- MCDONNELL, J. & WOODS, R. (2004): *On the need for catchment classification*. Journal of Hydrology(Amsterdam), 299, No. 1-2, p. 2–3
- MCMANARA, J. (1997): *Hydrograph separations in an Arctic watershed using mixing model and graphical techniques*. Water Resources Research, 33, No. 7, p. 1707–1719
- MERZ, R., BLÖSCHL, G. & PARAJKA, J. (2006): *Spatio-temporal variability of event runoff coefficients*. Journal of Hydrology, 331, No. 3-4, p. 591–604

-
- MERZ, R. & BLÖSCHL, G. (2009): *A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria*. Water Resources Research, 45, No. 1, p. 1–19
- MORHARD, A. (2012): *Kurzbeschreibung des Modells GWN-BW Bedienung und Erweiterungen in Version 3.x*, hydrosconsult. – 1 pp.
- NAEF, F. (1993): *Der Abflusskoeffizient: einfach und praktisch*. Aktuelle Aspekte in der Hydrologie. Zürcher Geographische Schriften, 53, p. 193–199
- NELDER, J. & MEAD, R. (1965): *A simplex method for function minimization*. The computer journal, 1, p. 308–313
- NORBIATO, D., BORGA, M., MERZ, R., BLÖSCHL, G. & CARTON, A. (2009): *Controls on event runoff coefficients in the eastern Italian Alps*. Journal of Hydrology, 375, No. 3–4, p. 312–325
- ODIN, L., KAY, A., ANDRÉASSIAN, V. & PERRIN, C. (2010): *Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar?* Water Resources Research, 46, p. 1–15
- PARAJKA, J., MERZ, R. & BLÖSCHL, G. (2005): *A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters*. Hydrology and Earth System Sciences, 2, p. 509–542
- PARAJKA, J., BLÖSCHL, G. & MERZ, R. (2007): *Regional calibration of catchment models: Potential for ungauged catchments*. Water Resources Research, 43, No. 6, p. 1–16
- PETERS, J., BAETS, B. D., VERHOEST, N. E., SAMSON, R., DEGROEVE, S., BECKER, P. D. & HUYBRECHTS, W. (2007): *Random forests as a tool for ecohydrological distribution modelling*. Ecological Modelling, 207, No. 2–4, p. 304–318
- PHILLIPS, J. (2003): *Sources of nonlinearity and complexity in geomorphic systems*. Progress in Physical Geography, 1, p. 1–23
- PITMAN, a. J. & STOUFFER, R. J. (2006): *Abrupt change in climate and climate models*. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 3, No. 4, p. 1745–1771
- PRASAD, A., IVERSON, L. & LIAW, A. (2006): *Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction*. Ecosystems, 9, No. 2, p. 181–199
- REFSGAARD, J. & KNUDSEN, J. (1996): *Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models*. Water Resources Research, 32, No. 7, p. 2189–2202
- RICHTER, D. (1995): *Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers*, Deutscher Wetterdienst

-
- SAVENIJE, H. H. G. (2009): *The art of hydrology*. Hydrology and Earth System Sciences, 13, No. 2, p. 157–161
- SCHERRER, S. & NAEF, F. (2007): *Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation*. Hydrology and Earth System Sciences, 11, p. 907–922
- SCHERRER, S. & NAEF, F. (2003): *A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland*. Hydrological Processes, 17, No. 2, p. 391–401
- SCHMOCKER-FACKEL, P., NAEF, F. & SCHERRER, S. (2007): *Identifying runoff processes on the plot and catchment scale*. Hydrology and Earth System Sciences, 11, No. 2, p. 891–906
- SEIBERT, J. (1999): *Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model*. Agricultural and Forest Meteorology, 98, No. 1, p. 279–293
- SHERMAN, L. K. (1932): *Streamflow from rainfall by the unit-graph method*. English News Record, 108, p. 501–505
- SIDLE, R., TSUBOYAMA, Y. & NOGUCHI, S. (2000): *Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm*. Hydrological Processes, 385, No. 14, p. 370–383
- SIVAKUMAR, B. (2004): *Dominant processes concept in hydrology: moving forward*. Hydrological Processes, 18, No. 12, p. 2349–2353
- SIVAPALAN, M., TAKEUCHI, K., FRANKS, S. W., GUPTA, V. K., KARAMBIRI, H., LAKSHMI, V., LIANG, X., McDONELL, J. J., MENDINIO, E. M., O’CONNELL, P. E., OKI, T., POMEROY, J. W., SCHERTZER, D., UHLENBROOK, S. & ZEHE, E. (2003): *IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences*. Hydrological Sciences Journal, 48, No. 6, p. 857–880
- STROBL, C., MALLEY, J. & TUTZ, G. (2009): *An introduction to recursive partitioning: rationale, application, and characteristics of classification and regression trees, bagging, and random forests*. Psychological methods, 14, No. 4, p. 323–348
- STROBL, C., BOULESTEIX, A.-L., KNEIB, T., AUGUSTIN, T. & ZEILEIS, A. (2008): *Conditional variable importance for random forests*. BMC bioinformatics, 9, p. 307
- TALLAKSEN, L. (1995): *A review of baseflow recession analysis*. Journal of hydrology, 165, p. 349–370
- TRAMBLAY, Y., BOUVIER, C., AYRAL, P.-a. & MARCHANDISE, A. (2011): *Impact of rainfall spatial distribution on rainfall-runoff modelling efficiency and initial soil moisture conditions estimation*. Natural Hazards and Earth System Science, 11, No. 1, p. 157–170

-
- TRAMBLAY, Y., BOUVIER, C., MARTIN, C., DIDON-LESCOT, J.-F., TODOROVIC, D. & DOMERGUE, J.-M. (2010): *Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall-runoff modelling*. Journal of Hydrology, 387, No. 3-4, p. 176–187
- VIVONI, E. & ENTEKHABI, D. (2007): *Controls on runoff generation and scale-dependence in a distributed hydrologic model*. Hydrology and Earth System Sciences, No. 4, p. 983–1029
- VOGEL, R. (2006): *Regional calibration of watershed models*. Watershed Models, No. 1, p. 1–15
- WABOA (2007): *Wasser- Bodenatlas Baden- Wuertemberg*, Umweltministerium Baden-Wuerttemberg, Landesanstalt fuer Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Wuerttemberg: Stuttgart
- WAGENER, T., WHEATER, H. & GUPTA, S. (2004): *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments*. World Scientific, 1, p. 253–306
- WAGENER, T. & MONTANARI, A. (2011): *Convergence of approaches toward reducing uncertainty in predictions in ungauged basins*. Water Resources Research, 47, No. 6, p. 1–8
- WAGENER, T., SIVAPALAN, M., TROCH, P. & WOODS, R. (2007): *Catchment classification and hydrologic similarity*. Geography Compass, 1, No. 4, p. 901–931
- WAGENER, T. & WHEATER, H. S. (2006): *Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty*. Journal of Hydrology, 320, No. 1-2, p. 132–154
- WEILER, M. (2005): *Subsurface stormflow*. Encyclopedia of Hydrological Sciences, No. 112, p. 1–14
- WOODS, R. & SIVAPALAN, M. (1999): *A synthesis of space-time variability in storm response: Rainfall, runoff generation, and routing*. Water Resources Research, 35, No. 8, p. 2469–2485
- YADAV, M., WAGENER, T. & GUPTA, H. (2007): *Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins*. Advances in Water Resources, 30, No. 8, p. 1756–1774
- ZEHE, E., ELSENBEER, H., LINDENMAIER, F., SCHULZ, K. & BLÖSCHL, G. (2007): *Patterns of predictability in hydrological threshold systems*. Water Resources Research, 43, No. 7, p. 4–12
- ZEHE, E., BECKER, R., BÁRDOSY, A. & PLATE, E. (2005): *Uncertainty of simulated catchment runoff response in the presence of threshold processes: Role of initial soil moisture and precipitation*. Journal of Hydrology, 315, No. 1-4, p. 183–202

ZEHE, E. & BLÖSCHL, G. (2004): *Predictability of hydrologic response at the plot and catchment scales: Role of initial conditions*. Water Resources Research, 40, No. 10, p. 1–21

Abkürzungsverzeichnis

α	α -Verteilungsparameter der theoretischen Beta-Verteilung
β	β -Verteilungsparameter der theoretischen Beta-Verteilung
Acker	Prozentualer Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche in einem Einzugsgebiet
B Sand	Prozentualer Anteil der Sand dominierten Böden in einem Einzugsgebiet
B Lehm	Prozentualer Anteil der Lehm dominierten Böden in einem Einzugsgebiet
B _ Ton	Prozentualer Anteil der Ton dominierten Böden in einem Einzugsgebiet
B _ 10 %	10 %-Quantil der Bodenfeuchte in einem Einzugsgebiet
B _ 90 %	90 % -Quantil der Bodenfeuchte in einem Einzugsgebiet
CART	Classification and Regression Tree
EZG	Einzugsgebiet
F _ emp	Empirische Verteilung
F _ theo	Theoretische Verteilung
Hoehe	Mittlere Einzugsgebietshöhe
HOF	Hortonischer Oberflächen Abfluss
kf-Para	kf-Parameter
KHV	Kumulative Verteilungsfunktion
MSE	Anstieg des mittleren quadratischen Fehlers
mtree	Anzahl der Regressionsbäume im 'Random-Forest' Packet in R
mtry	Anzahl der gewählten Parameter für einen Regressionsbaum im 'Random-Forest' Packet in R
N	Niederschlag
nFK	nutzbare Feldkapazität
obs	Zu schätzenden Wert
Q _ 10 %	10 % Quantil

Q_90 %	90 % Quantil
RMSE	Die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler
RF	Random Forest
RoGeR	Runoff Generation Research Modell
R²	Erklärte Varianz
R	Statistiksoftware R
sim	Ergebnis des Schätzers
SOF	Sättigungsoberflächenabfluss
TP	Tiefenperkolation
TOPmodel	Topography-based hydrological model
Wald	Prozentualer Anteil der bewaldeten Fläche in einem Einzugsgebiet
verdichtet	Prozentualer Anteil der verdichteten Fläche in einem Einzugsgebiet
ZA	Zwischenabfluss

Anhang

Tabelle 6: Pegel Nr. und Flussname der 65 ausgewählten Einzugsgebiete.

Pegel Nr.	EZG-Name	Pegel Nr.	EZG Name
139	Urach	2399	Oosbach
173	Umlach	2432	Teinach
192	Elta	2440	Fichtenberger Rot
205	Brehmbach	2446	Eschach
311	Giebach	2459	Nagold
361	Josbach	2461	Eyach
364	Steina	2462	Brotenaubach
368	Hauensteiner Alb	2471	Stunzach
375	Hasel	3301	Alb
380	Neumagen	3314	Rotach
385	Zastlerbach	3317	Rench
386	Brugga	3330	Elz
387	St. Wilhelmer Talbach	3411	Bottwar
393	Gutach	3496	Billinger Bach
396	Acher	4419	Echaz
1101	Dürnach	4433	Bllinger Bach
1109	Kirnach	4437	Jagst
1111	Wurzacher Ach	16472	Friesenheimer Dorfbach
1147	Stehenbach	24701	Firstbach
1162	Rottum	40670	Starzel
1166	Linach	44011	Weiherbach
1168	Ölbach	44012	Bühlöt
1169	Pfaffenrieder Bach	44013	Erlenbach
1170	Rappenbach	44367	Grünbach
1171	Schmiddisbach	44603	Erms
1438	Fils	57125	Grünbach
1439	Fils / Geislingen	58135	Fichtenberger Rot
1452	Lauter	60626	Büchler
1463	Ohrn	60627	Saubach
1472	Blinde Rot	62273	Mühlín
1489	Speltach	76149	Eyach
2362	Deggenhauser Aach	76290	Riof
2365	Rotbach		

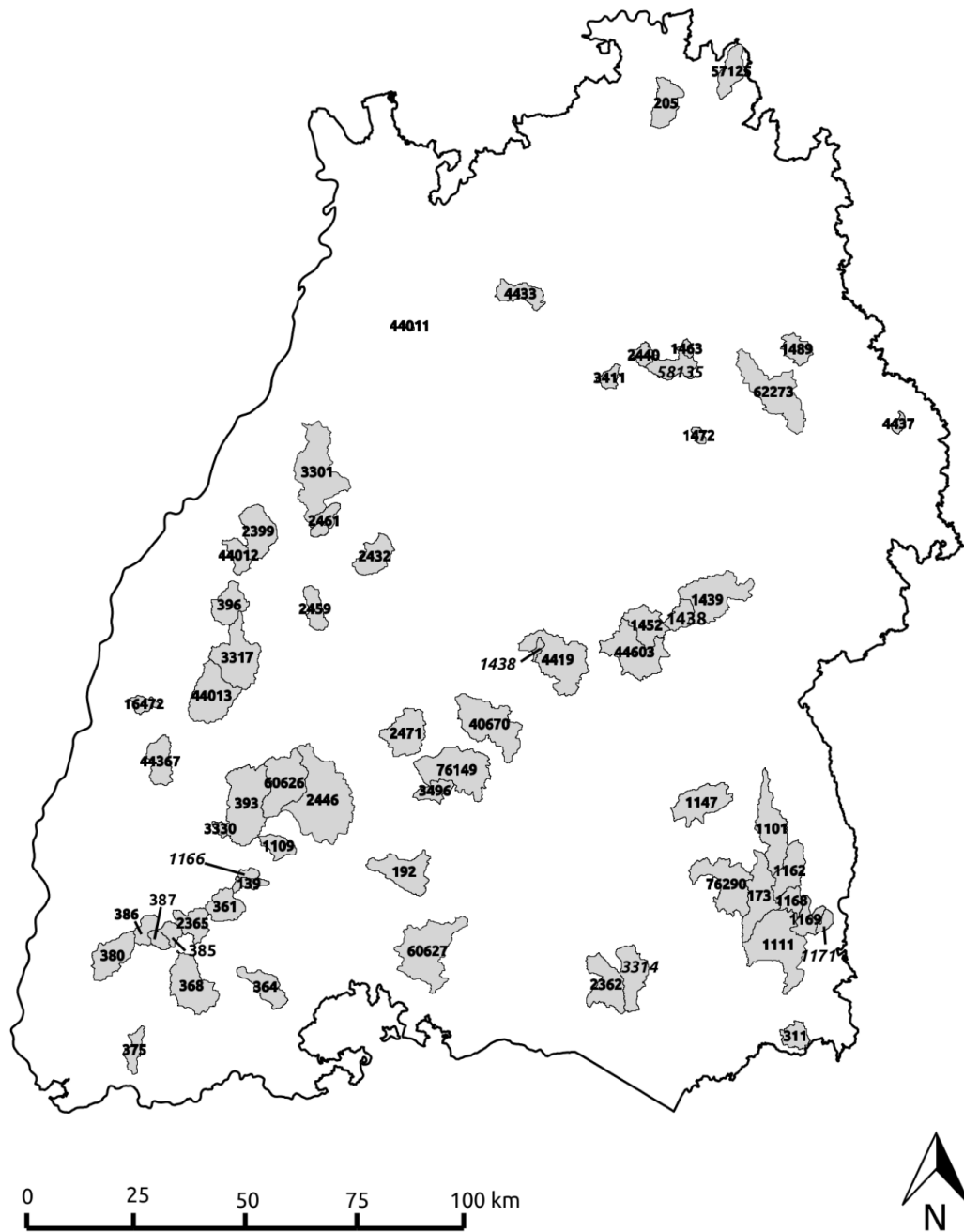


Abbildung 26: Die Pegel-Nr und die räumliche Verteilung der Einzugsgebiete die in dieser Studie verwendet werden. Pegel-Nr können in Tabelle nachgeschlagen werden.

Tabelle 7: Pegelnummern und extrahierten Einzugsgebietsparameter aus WABOA (2007).

EZG Parameter	139	173	192	205	311
Mittelwert	0,26	0,13	0,11	0,07	0,32
Schiefe	1,58	2,63	2,08	1,93	1,11
Variationskoef.	0,92	1,37	0,96	1,12	1,23
N [mm]	1,25	0,91	0,80	0,70	1,41
Verdichtet[%]	0,09	0,11	0,16	0,10	0,10
Wald [%]	0,62	0,24	0,44	0,31	0,24
Feuchtflächen [%]	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02
Acker [%]	0,29	0,46	0,26	0,57	0,62
B Flach [%]	0,05	0,10	0,31	0,81	0,00
B Mittel [%]	0,95	0,82	0,63	0,08	0,92
B Tief [%]	0,00	0,08	0,06	0,11	0,08
Fläche [km ²]	17,41	88,77	80,61	53,89	29,67
Höhe [m]	1001,94	646,29	771,32	342,40	671,48
Steigung [%]	12,06	3,62	7,53	6,65	3,72
Karst [0/1]	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
B Sand	1,00	0,03	0,02	0,00	0,00
B Lehm [%]	0,00	0,89	0,10	0,08	0,92
B Ton [%]	0,00	0,05	0,86	0,61	0,00
RMSE	0,07	0,04	0,10	0,05	0,16
Sensitivitätsfaktor	0,95	0,86	1,21	0,80	0,88

EZG Parameter	361	364	368	375	380
Mittelwert	0,27	0,22	0,35	0,20	0,23
Schiefe	1,70	1,56	1,12	1,82	1,74
Variationskoef.	1,25	0,96	1,36	1,02	1,08
N [mm]	1,24	1,03	1,59	1,25	1,36
Verdichtet[%]	0,09	0,10	0,10	0,14	0,11
Wald [%]	0,49	0,72	0,67	0,54	0,66
Feuchtflächen [%]	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Acker [%]	0,41	0,17	0,21	0,18	0,22
B Flach [%]	0,00	0,34	0,04	0,04	0,46
B Mittel [%]	1,00	0,66	0,95	0,96	0,54
B Tief [%]	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Fläche [km ²]	47,24	49,02	97,05	26,64	66,22
Höhe [m]	986,07	850,54	1020,79	587,68	794,94
Steigung [%]	10,72	8,55	13,09	9,87	20,85
Karst [0/1]	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
B Sand [%]	0,98	0,49	0,73	0,49	0,53
B Lehm [%]	0,00	0,32	0,04	0,48	0,47
B Ton [%]	0,02	0,20	0,21	0,02	0,00
RMSE	0,15	0,05	0,18	0,03	0,07
Sensitivitätsfaktor	1,07	0,91	0,90	1,05	0,93

EZG Parameter	385	386	387	393	396
Mittelwert	0,35	0,36	0,31	0,26	0,36
Schiefe	1,56	1,29	1,50	1,65	1,14
Variationskoef.	1,52	1,44	1,27	1,04	1,44
N [mm]	1,41	1,48	1,53	1,38	1,80
Verdichtet[%]	0,07	0,10	0,06	0,13	0,17
Wald [%]	0,81	0,70	0,75	0,65	0,69
Feuchtflächen [%]	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Acker [%]	0,10	0,19	0,18	0,20	0,07
B Flach [%]	0,35	0,37	0,28	0,04	0,18
B Mittel [%]	0,65	0,63	0,72	0,92	0,81
B Tief [%]	0,00	0,00	0,00	0,04	0,01
Fläche [km ²]	17,85	39,91	15,11	145,37	52,84
Höhe [m]	1053,28	983,84	1082,99	785,65	641,50
Steigung [%]	21,34	19,08	21,34	14,07	17,88
Karst [0/1]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B Sand [%]	0,65	0,57	0,61	0,93	0,92
B Lehm [%]	0,35	0,37	0,28	0,02	0,07
B Ton [%]	0,00	0,06	0,11	0,00	0,00
RMSE	0,15	0,14	0,08	0,06	0,17
Sensitivitätsfaktor	0,75	0,93	1,06	1,06	0,71

EZG Parameter	1101	1109	1111	1147	1162
Mittelwert	0,09	0,25	0,16	0,10	0,15
Schiefe	4,01	1,71	1,44	4,96	1,72
Variationskoef.	1,01	0,88	1,30	0,76	1,45
N [mm]	0,81	1,10	1,06	0,73	0,88
Verdichtet[%]	0,12	0,11	0,11	0,10	0,14
Wald [%]	0,27	0,58	0,21	0,20	0,23
Feuchtflächen [%]	0,02	0,00	0,11	0,00	0,00
Acker [%]	0,45	0,30	0,50	0,56	0,43
B Flach [%]	0,00	0,23	0,19	0,04	0,00
B Mittel [%]	0,77	0,77	0,63	0,46	0,88
B Tief [%]	0,23	0,00	0,17	0,50	0,12
Fläche [km ²]	94,58	29,70	152,38	79,34	57,82
Höhe [m]	585,32	898,07	684,36	561,26	649,80
Steigung [%]	2,81	7,11	2,59	2,55	3,42
Karst [0/1]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B Sand [%]	0,10	0,97	0,00	0,37	0,00
B Lehm [%]	0,69	0,03	0,83	0,46	0,88
B Ton [%]	0,14	0,00	0,00	0,16	0,10
RMSE	0,00	0,05	0,07	0,05	0,03
Sensitivitätsfaktor	1,14	1,37	1,02	1,22	1,19

EZG Parameter	1166	1168	1169	1170	1171
Mittelwert	0,27	0,11	0,15	0,16	0,03
Schiefe	1,47	2,22	2,09	1,78	1,73
Variationskoef.	0,99	1,01	1,29	0,99	0,86
N [mm]	1,28	0,94	1,03	1,01	1,01
Verdichtet[%]	0,09	0,08	0,08	0,08	0,06
Wald [%]	0,62	0,19	0,42	0,31	0,55
Feuchtflächen [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Acker [%]	0,28	0,68	0,48	0,61	0,39
B Flach [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B Mittel [%]	1,00	0,98	0,98	0,70	0,59
B Tief [%]	0,00	0,02	0,02	0,30	0,41
Fläche [km ²]	9,31	24,73	29,93	7,37	12,18
Hoehe [m]	991,79	685,19	714,55	703,15	702,99
Steigung [%]	11,98	2,26	2,59	2,55	2,37
Karst [0/1]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B Sand [%]	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B Lehm [%]	0,00	0,98	0,98	0,70	0,59
B Ton [%]	0,00	0,02	0,02	0,30	0,41
RMSE	0,09	0,02	0,07	0,09	0,02
Sensitivitätsfaktor	0,77	1,08	1,04	1,20	1,32

EZG Parameter	1438	1439	1452	1463	1472
Mittelwert	0,15	0,27	0,24	0,14	0,28
Schiefe	2,91	1,48	1,87	2,31	1,20
Variationskoef.	0,96	0,99	1,40	0,88	1,06
N [mm]	1,04	0,98	0,97	0,91	1,04
Verdichtet[%]	0,09	0,13	0,16	0,12	0,15
Wald [%]	0,56	0,47	0,40	0,54	0,40
Feuchtflächen [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Acker [%]	0,16	0,18	0,26	0,34	0,43
B Flach [%]	0,90	0,69	0,64	0,00	0,00
B Mittel [%]	0,05	0,22	0,31	1,00	0,99
B Tief [%]	0,05	0,09	0,05	0,00	0,01
Fläche [km ²]	30,33	145,23	56,68	9,32	8,26
Hoehe [m]	752,90	676,76	684,11	474,14	519,63
Steigung [%]	9,61	10,58	8,98	4,43	5,31
Karst [0/1]	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
B Sand [%]	0,00	0,00	0,00	0,98	0,72
B Lehm [%]	0,05	0,04	0,25	0,00	0,27
B Ton [%]	0,95	0,96	0,75	0,02	0,01
RMSE	0,03	0,08	0,11	0,05	0,12
Sensitivitätsfaktor	1,16	1,03	1,27	0,70	0,88

EZG Parameter	1489	2362	2365	2399	2432
Mittelwert	0,18	0,11	0,26	0,21	0,14
Schiefe	1,80	2,39	1,53	1,99	2,98
Variationskoef.	0,76	1,17	1,14	1,10	0,71
N [mm]	0,79	0,90	1,26	1,32	0,93
Verdichtet[%]	0,12	0,11	0,13	0,17	0,14
Wald [%]	0,31	0,40	0,56	0,72	0,62
Feuchtflächen [%]	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Acker [%]	0,52	0,31	0,29	0,10	0,04
B Flach [%]	0,00	0,01	0,27	0,28	0,22
B Mittel [%]	0,94	0,89	0,68	0,67	0,77
B Tief [%]	0,06	0,10	0,05	0,05	0,01
Fläche [km ²]	33,04	74,66	40,18	71,04	51,91
Hoehe [m]	456,80	621,66	951,84	463,23	630,86
Steigung [%]	3,45	6,41	14,01	14,69	7,24
Karst [0/1]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B Sand [%]	0,28	0,22	0,44	0,66	0,91
B Lehm [%]	0,21	0,71	0,27	0,29	0,05
B Ton [%]	0,51	0,07	0,24	0,05	0,04
RMSE	0,02	0,02	0,07	0,00	0,02
Sensitivitätsfaktor	1,08	0,88	0,74	0,63	0,90

EZG Parameter	2440	2446	2459	2461	2462
Mittelwert	0,22	0,15	0,14	0,23	0,24
Schiefe	1,85	2,12	1,86	2,02	1,74
Variationskoef.	0,89	0,84	0,93	1,13	0,97
N [mm]	0,89	0,87	1,28	1,24	1,30
Verdichtet[%]	0,19	0,15	0,09	0,07	0,06
Wald [%]	0,45	0,36	0,76	0,79	0,72
Feuchtflächen [%]	0,00	0,00	0,00	0,06	0,12
Acker [%]	0,29	0,29	0,14	0,08	0,09
B Flach [%]	0,00	0,23	0,42	0,89	0,83
B Mittel [%]	1,00	0,70	0,58	0,09	0,09
B Tief [%]	0,00	0,07	0,00	0,02	0,08
Fläche [km ²]	17,31	205,85	33,71	30,25	9,62
Hoehe [m]	491,57	714,15	744,77	792,09	862,40
Steigung [%]	4,68	3,59	8,33	12,28	9,77
Karst [0/1]	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
B Sand [%]	0,94	0,37	0,99	0,96	0,92
B Lehm [%]	0,06	0,08	0,01	0,02	0,00
B Ton [%]	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00
RMSE	0,06	0,02	0,04	0,14	0,15
Sensitivitätsfaktor	0,81	0,81	0,96	0,65	0,96

EZG Parameter	2471	3301	3314	3317	3330
Mittelwert	0,17	0,20	0,14	0,30	0,35
Schiefe	2,61	2,10	3,06	1,42	0,55
Variationskoef.	0,92	1,11	1,20	1,12	1,98
N [mm]	0,82	1,02	0,91	1,53	1,58
Verdichtet[%]	0,14	0,17	0,12	0,15	0,07
Wald [%]	0,47	0,64	0,36	0,74	0,74
Feuchtflächen [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Acker [%]	0,29	0,12	0,26	0,10	0,17
B Flach [%]	0,01	0,43	0,00	0,33	0,00
B Mittel [%]	0,96	0,40	0,90	0,67	0,87
B Tief [%]	0,04	0,17	0,10	0,00	0,13
Fläche [km ²]	76,08	149,80	67,64	108,36	7,35
Höhe [m]	573,97	444,88	632,01	603,75	1035,33
Steigung [%]	6,46	9,33	5,36	18,31	9,23
Karst [0/1]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B Sand [%]	0,51	0,82	0,15	0,90	0,81
B Lehm [%]	0,32	0,00	0,74	0,10	0,06
B Ton [%]	0,18	0,17	0,08	0,00	0,00
RMSE	0,01	0,07	0,03	0,06	0,24
Sensitivitätsfaktor	1,27	0,90	0,93	0,59	0,93

EZG Parameter	3411	3496	4419	4433	4437
Mittelwert	0,12	0,18	0,26	0,09	0,24
Schiefe	2,31	1,61	2,30	2,17	1,13
Variationskoef.	1,01	1,13	1,49	1,39	0,82
N [mm]	0,88	0,87	0,81	0,71	0,79
Verdichtet[%]	0,14	0,13	0,31	0,15	0,05
Wald [%]	0,70	0,59	0,37	0,21	0,31
Feuchtflächen [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Acker [%]	0,05	0,26	0,24	0,63	0,54
B Flach [%]	0,00	0,36	0,38	0,00	0,00
B Mittel [%]	0,97	0,64	0,42	0,09	0,87
B Tief [%]	0,03	0,00	0,20	0,91	0,13
Fläche [km ²]	17,16	28,71	133,26	42,66	9,15
Höhe [m]	392,91	819,87	534,28	227,11	525,69
Steigung [%]	10,98	9,98	8,22	3,24	1,69
Karst [0/1]	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00
B Sand [%]	0,90	0,00	0,03	0,00	0,00
B Lehm [%]	0,02	0,30	0,09	0,08	0,13
B Ton [%]	0,08	0,70	0,88	0,92	0,87
RMSE	0,04	0,01	0,03	0,02	0,12
Sensitivitätsfaktor	0,74	1,39	1,12	0,86	1,05

EZG Parameter	16472	24701	40670	44011	44012
Mittelwert	0,09	0,12	0,17	0,04	0,24
Schiefe	1,82	2,32	2,66	1,78	2,04
Variationskoef.	0,97	1,35	1,00	2,06	1,11
N [mm]	0,83	0,76	0,86	0,71	1,42
Verdichtet[%]	0,22	0,45	0,18	0,08	0,20
Wald [%]	0,51	0,23	0,47	0,10	0,64
Feuchtflächen [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Acker [%]	0,11	0,23	0,27	0,74	0,13
B Flach [%]	0,02	0,00	0,32	0,00	0,10
B Mittel [%]	0,43	0,89	0,68	0,15	0,87
B Tief [%]	0,55	0,11	0,00	0,85	0,03
Fläche [km ²]	16,96	6,85	123,40	3,10	30,20
Hoehe [m]	315,88	397,83	643,65	207,86	537,42
Steigung [%]	9,91	4,12	7,81	4,57	15,90
Karst [0/1]	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
B Sand [%]	0,45	0,06	0,08	0,00	0,90
B Lehm [%]	0,00	0,12	0,22	0,00	0,06
B Ton [%]	0,55	0,82	0,70	1,00	0,03
RMSE	0,04	0,16	0,04	0,02	0,02
Sensitivitätsfaktor	1,01	1,08	0,88	1,19	0,94

EZG Parameter	44013	44367	44603	57125	58135
Mittelwert	0,22	0,18	0,18	0,06	0,25
Schiefe	2,04	2,15	2,76	1,56	1,44
Variationskoef.	0,95	1,01	1,03	1,46	0,96
N [mm]	1,28	0,98	0,92	0,64	0,93
Verdichtet[%]	0,16	0,14	0,14	0,12	0,15
Wald [%]	0,67	0,62	0,50	0,20	0,52
Feuchtflächen [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Acker [%]	0,12	0,18	0,26	0,68	0,25
B Flach [%]	0,21	0,25	0,83	0,58	0,00
B Mittel [%]	0,74	0,72	0,14	0,12	1,00
B Tief [%]	0,04	0,04	0,03	0,30	0,00
Fläche [km ²]	103,17	48,88	108,19	46,09	62,34
Hoehe [m]	520,13	431,13	707,04	318,82	478,00
Steigung [%]	15,79	13,76	9,51	4,81	5,64
Karst [0/1]	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00
B Sand [%]	0,81	0,75	0,00	0,00	0,87
B Lehm [%]	0,14	0,21	0,14	0,12	0,07
B Ton [%]	0,04	0,04	0,87	0,43	0,06
RMSE	0,04	0,07	0,05	0,04	0,09
Sensitivitätsfaktor	0,81	0,56	1,17	1,00	0,76

EZG Parameter	60626	60627	62273	76149	76290
Mittelwert	0,25	0,03	0,22	0,18	0,09
Schiefe	1,75	4,13	1,94	2,04	2,27
Variationskoef.	1,26	1,11	0,88	1,01	1,15
N [mm]	1,10	0,77	0,84	0,86	0,84
Verdichtet[%]	0,17	0,13	0,11	0,22	0,11
Wald [%]	0,55	0,43	0,45	0,45	0,21
Feuchtflächen [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
Acker [%]	0,23	0,34	0,27	0,22	0,47
B Flach [%]	0,38	0,37	0,00	0,40	0,40
B Mittel [%]	0,62	0,53	0,94	0,59	0,40
B Tief [%]	0,00	0,10	0,06	0,02	0,20
Fläche [km ²]	105,77	144,65	124,50	128,52	102,35
Hoehe [m]	730,16	616,82	450,91	719,91	590,55
Steigung [%]	11,79	5,94	5,04	8,79	2,22
Karst [0/1]	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
B Sand [%]	0,93	0,06	0,68	0,00	0,01
B Lehm [%]	0,06	0,60	0,08	0,16	0,79
B Ton [%]	0,00	0,33	0,25	0,84	0,00
RMSE	0,09	0,07	0,07	0,04	0,02
Sensitivitätsfaktor	1,08	1,15	0,77	0,74	0,98

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

(Unterschrift)

(Ort, Datum)

