Professur für Hydrologie

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Pascal Heilmann

Auswertung gemessener Abflussganglinien zur Identifikation der maßgeblichen Abflussprozesse bei kurzen Starkregen in mesoskaligen Einzugsgebieten in Baden-Württemberg

Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler Korreferent: Dr. Michael Stölzle Betreuung: Andreas Steinbrich

Freiburg i. Br., 30. März 2019

Inhaltsverzeichnis

Verzeich	hnis der Abbildung im Text	V
Verzeich	hnis der Karten im Text	VIII
Verzeich	hnis der Abbildungen im Anhang	IX
Verzeich	hnis der Karten im Anhang	X
Verzeich	hnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole	XIII
Zusamm	nenfassung	XV
1. Einle	eitung	1
2. Aktu	eller Wissensstand	3
2.1 Ni	liederschlag-Abfluss Modelle	3
2.1.1	Kalibrierte Modelle	3
2.1.2	Regionalisierung	4
2.1.3	Unkalibrierte Modelle	4
2.2 St	tarkniederschläge	5
2.2.1	Entstehung und Auftreten	5
2.2.2	Saisonalität	6
2.2.3	Klimawandel	6
2.3 At	bflussbildungsprozesse	7
2.3.1	Oberflächenabfluss	7
2.3.2	Infiltration	7
2.3.3	Zwischenabfluss	8
2.3.4	Tiefenperkolation und Basisabfluss	9
2.4 Be	eeinflussende Faktoren auf die Abflussbildung	10
2.4.1	Vorfeuchte	10
2.4.2	Abflusskoeffizient	10
2.4.3	Topographie und Bodenmächtigkeit	12

	2.5	Auf	ftrennung der Abflusskomponenten	12
	2.5.	1	Oberflachen- und Zwischenabfluss	12
	2.5.	2	Basisabfluss	13
	2.6	Abf	flusstypen	15
3.	Pro	oble	emstellung und Zielsetzung	17
4.	Ме	tho	oden und Vorgehensweise	18
	4.1	Ro	GeR	18
	4.1.	1	Entwicklung RoGeR	18
	4.1.	2	Datengrundlage und GWN-BW	19
	4.2	Ge	bietsauswahl	20
	4.3	Ме	ssdaten	21
	4.3.	1	Datengrundlage	21
	4.3.	2	Datenaufbereitung	22
	4.4	Ere	eignisseparation	23
	4.4.	1	Niederschlagsseparation	23
	4.4.	2	Abflussseparation	24
	4.5	BF	I Kurven	26
	4.5.	1	Variation der Blockgröße	26
	4.5.	2	Aufteilung in Szenarien	26
	4.6	Ein	heitsganglinien	27
	4.7	Vei	rgleich der berechneten Abflusskomponenten mit RoGeR	29
	4.8	Zus	sammenführung der Untersuchungsgebiete	29
5.	Erg	geb	nisse	31
;	5.1	Dat	tenaufbereitung	31
	5.2	Ere	eignisseparation	33
;	5.3	BF	I Kurven	36
;	5.4	Ein	heitsganglinien	39

5.5	Abflusskomponententrennung	41
5.5.	1 Mittelung aus den Szenarien	41
5.5.	2 Szenario 3	43
5.5.	3 Szenario 4	45
5.6	Gebietszusammenfassung	
5.6.	1 Mittelung aus den Szenarien	48
5.6.	2 Szenario 3	53
5.6.	3 Szenario 4	59
6. Dis	skussion	66
6.1	Datenaufbereitung	66
6.2	Ereignisseparation	67
6.3	Variation der Blockgröße	68
6.4	Einheitsganglinien und Abflusskomponententrennung	70
6.5	Vergleich der Ergebnisse mit RoGeR	73
7. Sc	hlussfolgerungen	76
Literat	turverzeichnis	78
Anhar	ng I – Gebietsbeschreibungen	83
Anhar	ng II – Szenario 1	109
Anhar	ng III – Szenario 2	114

Verzeichnis der Abbildung im Text

Abbildung 2.1:	Abflussbildungsprozesse eines Einzugsgebietes (Steinbrich et al., 2016)	9
Abbildung 2.2:	,Delayed Flow Curves' für mehrere Einzugsgebiete in 4 unterschiedliche	
	Niederschlagsszenarien und für das gesamte Jahr und Halbjahre aufgeteilt.	
	Aus allen Gebieten wurde zudem eine Mittelung der DFI Kurven durchgeführt	
	(Stölzle et al., unveröffentlicht).	15
Abbildung 4.1:	Dauerkurve für das Einzugsgebiet der Brugga.	25
Abbildung 4.2:	Gefälle-Fließgeschwindigkeit Kurven für verschiedene Bodenmächtigkeiten,	
	welche für die Berechnung des Zwischenabflusses benötigt werden (Steinbrich	
	et al., 2015)	28
Abbildung 5.1:	Rohdaten des Niederschlages für die Messstationen Nr. 1602 (oben) und 2812	
	(unten) des DWD für das Untersuchungsgebiet des Friesenheimer Dorfbachs	31
Abbildung 5.2:	Modifizierte und gemittelte Niederschlagsdaten aus den beiden Messstationen	
	des DWD für den Friesenheimer Dorfbach.	32
Abbildung 5.3:	Ereignis eines kurzen Niederschlages im Einzugsgebiet der Brugga, welches	
	mit der Niederschlagsseparationsmethode abgetrennt wurde	33
Abbildung 5.4:	Ereignis eines Starkniederschlages im Einzugsgebiet der Brugga, welches mit	
	der Niederschlagsseparationsmethode abgetrennt wurde	34
Abbildung 5.5:	Ereignis eines mittleren Niederschlages im Einzugsgebiet der Brugga, welches	
	mit der Abflussseparationsmethode abgetrennt wurde	34
Abbildung 5.6:	Ereignis mit mehreren mittleren Niederschlägen und Abflussspitzen im	
	Einzugsgebiet der Brugga, welches mit der Abflussseparationsmethode	
	abgetrennt wurde	35
Abbildung 5.7:	Ereignis mit mehreren sehr schwachen Niederschlägen und Abflussspitzen im	
	Einzugsgebiet der Brugga, welches mit der Abflussseparationsmethode	
	abgetrennt wurde	36
Abbildung 5.8:	BFI Kurven für alle separierten Ereignisses des Brugga Einzugsgebietes	37
Abbildung 5.9:	BFI Kurven für alle separierten Ereignisses des Brugga Einzugsgebietes. Die	
	x-Achse ist für eine bessere Übersicht logarithmisch normiert.	37
Abbildung 5.10:	BFI Kurven für alle separierten Ereignisses des Brugga Einzugsgebietes. Die	
	Ereignisse wurden nach der Niederschlagsintensität und -dauer in vier Klassen	
	eingeteilt. Die x-Achse ist für eine bessere Übersicht logarithmisch normiert	38
Abbildung 5.11:	BFI Kurven für alle separierten Ereignisses des Brugga Einzugsgebietes. Die	
	Ereignisse wurden nach den Vorfeuchtebedingungen in drei Klassen eingeteilt.	
	Die x-Achse ist für eine bessere Übersicht logarithmisch normiert	39

Abbildung 5.12:	Geschwindigkeitsverteilung des Horton'schen Oberflächenabflusses für das	
	Einzugsgebiet der Brugga. Die x- und y-Achse entsprechen der Anzahl der	
	vorhandenen Rasterzellen mit einer Auflösung von 5x5 Meter	40
Abbildung 5.13:	Geschwindigkeitsverteilung des Zwischenabflusses für das Einzugsgebiet der	
	Brugga. Die x- und y-Achse entsprechen der Anzahl der vorhandenen	
	Rasterzellen mit einer Auflösung von 5x5 Meter.	40
Abbildung 5.14:	Einheitsganglinien des Horton'schen Oberflächen- und Zwischenabflusses für	
	das Einzugsgebiet der Brugga	41
Abbildung 5.15:	Abflusskomponenten des Oberflächen-, Zwischen- und Basisabflusses für das	
	Einzugsgebiet der Brugga. Der Basisabfluss wurde als Mittelwert der BFI	
	Kurven für alle Niederschlags-Abfluss Ereignisse abgeleitet	42
Abbildung 5.16:	Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven für alle	
	Events mit den gemittelten RoGeR Abflusskomponenten aus allen vier	
	Szenarien für das Brugga Einzugsgebiet	43
Abbildung 5.17:	Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven für	
	alle Events mit den gemittelten RoGeR Abflusskomponenten aus allen vier	
	Szenarien für das Brugga Einzugsgebiet. Die Abweichung ist logarithmisch	
	normiert	43
Abbildung 5.18:	Abflusskomponenten des Oberflächen-, Zwischen- und Basisabflusses für das	
	Einzugsgebiet der Brugga. Der Basisabfluss wurde als Mittelwert der BFI	
	Kurven für das Szenario 3 abgeleitet	44
Abbildung 5.19:	Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den	
	RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 3 und das Einzugsgebiet der	
	Brugga	45
Abbildung 5.20:	Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit	
	den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 3 und das Einzugsgebiet	
	der Brugga. Die Abweichung ist logarithmisch dargestellt.	45
Abbildung 5.21:	Abflusskomponenten des Oberflächen-, Zwischen- und Basisabflusses für das	
	Einzugsgebiet der Brugga. Der Basisabfluss wurde als Mittelwert der BFI	
	Kurven für das Szenario 4 abgeleitet	46
Abbildung 5.22:	Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den	
	RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 4 und das Einzugsgebiet der	
	Brugga	47
Abbildung 5.23:	Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit	
	den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 4 und das Einzugsgebiet	
	der Brugga. Die Abweichung ist logarithmisch dargestellt.	47

Abbildung 5.24:	Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven für alle	
	Events mit den gemittelten RoGeR Abflusskomponenten aus allen vier	
	Szenarien für alle 26 Untersuchungsgebiete4	18
Abbildung 5.25:	Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven für	
	alle Events mit den gemittelten RoGeR Abflusskomponenten aus allen vier	
	Szenarien für alle 26 Untersuchungsgebiete4	19
Abbildung 5.26:	Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den	
	RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 3 und den 24 vorhandenen	
	Untersuchungsgebieten	54
Abbildung 5.27:	Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit	
	den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 3 und den 24 vorhandenen	
	Untersuchungsgebieten. Die Abweichung ist logarithmisch dargestellt	55
Abbildung 5.28:	Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den	
	RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 4 und den 25 vorhandenen	
	Untersuchungsgebiete	50
Abbildung 5.29:	Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit	
	den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 4 und den 25 vorhandenen	
	Untersuchungsgebiete. Die Abweichung ist logarithmisch dargestellt.	51

Verzeichnis der Karten im Text

Karte 5.1: Prozentuale Abweichung des Horton'schen Oberflächenabflusses in seiner	
räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung	
wurde aus allen BFI Kurven berechnet	51
Karte 5.2: Prozentuale Abweichung des Basisabflusses in seiner räumlichen Verteilung über	
ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus allen BFI Kurven	
berechnet	52
Karte 5.3: Prozentuale Abweichung des Zwischenabflusses in seiner räumlichen Verteilung	
über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus allen BFI	
Kurven berechnet	53
Karte 5.4: Prozentuale Abweichung des Horton'schen Oberflächenabfluss in seiner räumlichen	
Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus	
den 24 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 3 berechnet	56
Karte 5.5: Prozentuale Abweichung des Basisabflusses in seiner räumlichen Verteilung über	
ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 24	
vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 3 berechnet	57
Karte 5.6: Prozentuale Abweichung des Zwischenabflusses in seiner räumlichen Verteilung	
über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 24	
vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 3 berechnet	58
Karte 5.7: Prozentuale Abweichung des Horton'schen Oberflächenabflusses in seiner	
räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung	
wurde aus den 25 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 4 berechnet	62
Karte 5.8: Prozentuale Abweichung des Basisabflusses in seiner räumlichen Verteilung über	
ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25	
vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 4 berechnet	63
Karte 5.9: Prozentuale Abweichung des Zwischenabflusses in seiner räumlichen Verteilung	
über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25	
vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 4 berechnet	64

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

A-Abbildung 1:	Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den	
	RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 1 und den 25 vorhandenen	
	Untersuchungsgebieten	109
A-Abbildung 2:	Prozentuale Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI	
	Kurven mit den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 3 und den 25	
	vorhandenen Untersuchungsgebieten.	110
A-Abbildung 3:	Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den	
	RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 2 und den 25 vorhandenen	
	Untersuchungsgebieten	114
A-Abbildung 4:	Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den	
	RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 2 und den 25 vorhandenen	
	Untersuchungsgebieten	115

Verzeichnis der Karten im Anhang

A-Karte 1:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Bühlot.	83
A-Karte 2:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Teinach.	84
A-Karte 3:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Eyach.	85
A-Karte 4:	Landnutzung des Einzugsgebietes des Friesenheimer Dorfbachs	86
A-Karte 5:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Rottum.	87
A-Karte 6:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Stunzach	88
A-Karte 7:	Landnutzung des Einzugsgebietes des Zulaufs zum Ölbach.	89
A-Karte 8:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Steina.	90
A-Karte 9:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Acher.	91
A-Karte 10:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Lindach.	92
A-Karte 11:	Landnutzung des Einzugsgebietes des Brehmbachs	93
A-Karte 12:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Kirnach.	94
A-Karte 13:	Landnutzung des Einzugsgebietes des Weiherbachs.	95
A-Karte 14:	Landnutzung des Einzugsgebietes des Krähenbachs.	96
A-Karte 15:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Deggenhausener Aach.	97
A-Karte 16:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Brugga.	98
A-Karte 17:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Fichtenberger Rot.	99
A-Karte 18:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Starzel.	100
A-Karte 19:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Elz.	101
A-Karte 20:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Rems	102
A-Karte 21:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Umlach.	103
A-Karte 22:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Lauter	104
A-Karte 23:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Neumagen.	105
A-Karte 24:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Speltach.	106
A-Karte 25:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Hasel	107
A-Karte 26:	Landnutzung des Einzugsgebietes der Schutter.	108
A-Karte 27:	Prozentuale Abweichung des Horton'schen Oberflächenabfluss in seiner	
	räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale	
	Abweichung wurde aus den 25 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 1	
	berechnet.	111
A-Karte 28:	Prozentuale Abweichung des Basisabflusses in seiner räumlichen Verteilung über	
	ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25	
	vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 1 berechnet	112
A-Karte 29:	Prozentuale Abweichung des Zwischenabflusses in seiner räumlichen Verteilung	
	über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25	
	vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 1 berechnet.	113

A-Karte 30:	Prozentuale Abweichung des Horton'schen Oberflächenabfluss in seiner	
	räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale	
	Abweichung wurde aus den 25 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 2	
	berechnet.	116
A-Karte 31:	Prozentuale Abweichung des Basisabflusses in seiner räumlichen Verteilung über	
	ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25	
	vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 2 berechnet	117
A-Karte 32:	Prozentuale Abweichung des Zwischenabflusses in seiner räumlichen Verteilung	
	über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25	
	vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 2 berechnet.	118

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
ATKIS	Amtliche topographisch-kartographisches	
	Informationssystem	
BF	Basisabfluss	m^3/s
BFI	Baseflow Index	
BK 50	Bodenkarte im Maßstab 1:50.000	
BÜK 200	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:200.000	
CORINE	Coordination of Information on the Environment	
DFI	Delayed Flow Index	
DGM	Digitales Geländemodell	
DWD	Deutscher Wetter Dienst	
HOF	Horton'scher Oberflächenabfluss	m^3/s
HRU	Hydrological Response Unit	
HVZ	Hochwasservorhersagezentrale	
GIS	Geoinformationssystemen	
GK 50	Geologische Karte im Maßstab 1:50.000	
GWN-BW	Grundwasserneubildung – Baden-Württemberg	
k	Strickler Wert	
LUBW	Landesanstalt für Umwelt in Baden-Württemberg	
n	Blocklänge	h
nFK	Nutzbare Feldkapazität	%
Р	Precipitation	mm
PE	Potential Evapotranspiration	mm
RADOLAN	Radar-Online-Aneichung	
REGNIE	Regionalisierung von Niederschlagshöhen	
RoGeR	Runoff Generation Research	
S	Gefälle	%
SARR	Sliding Average with Rain Record	
SCS-CN	Soil Conservation Service – Curve Number	
SOF	Sättigungsoberflächenabfluss	m ³ /s
SSF	Subsurface Flow	m ³ /s
ТК	Topographische Karten	
ТР	Tiefenperkolation	m ³ /s
UKIH	United Kingdom, Institute of Hydrology	
v	Geschwindigkeit	m/s oder m/min
WaBoA	Wasser und Bodenatlas in Baden-Württemberg	
WMO	World Meteorological Organisation	

Zusammenfassung

Das Modell Runoff Generation Research (RoGeR) ist ein unkalibriertes Niederschlags-Abfluss Modell, welches von der Universität Freiburg entwickelt wurde. Das Ziel des Modells besteht in der korrekten Simulation der Abflusskonzentration und -komponenten bei Starkniederschlägen in unbemessenen Einzugsgebieten in Baden-Württemberg. Durch seine hohe Parametrisierung, das große Prozessverständnis und die gute Datengrundlage liefert es vielversprechende erste Ergebnisse, jedoch wird das Abflussverhalten einiger Einzugsgebiete nicht korrekt wiedergegeben. Um die Stärken und Schwächen des Modells RoGeR genauer analysieren zu können, wurde die Anzahl der Untersuchungsgebiete für diese Analyse deutlich ausgeweitet.

Für die bemessenen Untersuchungsgebiete werden dabei mithilfe von Niederschlags- und Abflussdaten Starkniederschlagsereignisse separiert. Für die einzelnen Ereignisse werden nach einer neuen Methode von Stölzle et al. (unveröffentlicht) "Baseflow Index" (BFI) Kurven berechnet, welche in Kombination mit dem Einheitsganglinienverfahren zur Aufteilung der unterschiedlichen Abflusskomponenten genutzt wurden. Dies wurde für vier Szenarien, welche sich in ihrer Niederschlagshöhe, -dauer und Bodenvorfeuchte unterschieden, durchgeführt und mit den Ergebnissen von RoGeR verglichen.

Die Ergebnisse zeigen für einzelne Einzugsgebiete und Szenarien gute Übereinstimmungen, jedoch sind keine flächendeckenden oder allgemeingültigen Aussagen möglich. Der Zwischenabfluss (SSF) wird in den steilen Gebieten des Schwarzwaldes und unter hohen Vorfeuchtebedingungen mit der größten Übereinstimmung berechnet. Der Horton'sche Oberflächenabfluss (HOF) liefert in den flachen Untersuchungsgebieten die besten Ergebnisse. Für den Basisabfluss (BF) sind keine klaren räumlichen Tendenzen zu erkennen, jedoch wird dieser von allen Abflusskomponenten mit der besten Übereinstimmung zu RoGeR berechnet. Die größten Probleme bereiten die Einzugsgebiete in den Karstlandschaften der Schwäbischen Alp, welche durch einen geringen Oberflächen- und Zwischenabfluss geprägt sind.

Insgesamt wird der Zwischenabfluss in den meisten Untersuchungsgebieten deutlich überschätzt und der Oberflächen- und Basisabfluss unterschätzt. Die Probleme können durch die geringe Datengrundlage, Schwächen bei der Ereignisseparation und der Auswahl der Methoden für die Abflusskomponententrennung erklärt werden. Trotz dieser Kritikpunkte besitzen die BFI Kurven ein hohes ungenutztes Potential, welches durch die Modifizierung einiger Methoden (z.B. die Nutzung von Radardaten des Niederschlages) besser ausgeschöpft werden könnte.

Schlüsselwörter

Niederschlag-Abfluss Modellierung, Runoff Generation Research, Ereignisseparation, Einzugsgebiete, Abflusskomponententrennung, Einheitsganglinien, Baseflow-Index Kurven, Baden-Württemberg

1. Einleitung

Eine der wichtigsten und zugleich schwierigsten Aufgaben der Hydrologie besteht in der quantitativen Erfassung und Vorhersage von Hochwasserereignissen (Klaffl, 2011). Die meisten Menschen verbinden eine Hochwassergefahr mit der Nähe zu großen Flussgebieten. Beispielhaft hierfür kann die Flut von 2013, die weite Teile Deutschlands betroffen hat, angeführt werden. Dabei stiegen die Pegelstände der Elbe und Donau auf Werte, welche seit 500 Jahren nicht erreicht wurden und verursachten schwere Überschwemmungen in vielen flussnahen Bereichen. Der Schaden wurde auf mehr als 15 Milliarden Euro beziffert (Tagesspiegel, zuletzt geöffnet 06.03 2019).

Aber auch kleinflächigere Überschwemmungen haben in den letzten Jahren an medialer Bedeutung gewonnen. Als Beispiele dienen hierfür die Überschwemmungen in Braunsbach (Baden-Württemberg) oder Ansbach (Bayern). Durch extreme Regenfälle kommt es besonders an Hanglagen, in kleinen Einzugsgebieten und in verstädterten Gebieten zu sogenannten "Flash Floods", welche große Schadenssummen verursachen (Steinbrich et al., 2016). In Braunsbach schwollen zwei kleine Flüsse zu reißenden Strömen an, welche mit mehr als einem halben Meter Wasserhöhe durch die Straßen und Wege strömten. Jeder Einschnitt im Gelände dient dabei als potenzieller Abflussweg. Durch die hohen Strömungskräfte ist das Wasser in der Lage Bäume zu entwurzeln, Autos wegzuspülen und ganze Häuser zu zerstören. Die Kanalnetze sind nicht in der Lage die Wassermassen abzufangen (Welt, zuletzt geöffnet 06.03 2019).

Aus diesen Gründen hat sich die Landesanstalt für Umwelt in Baden-Württemberg (LUBW) für die Erstellung von flächendeckenden Starkregengefahrenkarten entschieden, welche die Ausdehnung der Überflutung, die Fließgeschwindigkeiten und Überflutungstiefe darstellen sollen (LUBW, 2016). Dies gestaltet sich jedoch schwierig, da in den meisten kleinen und bergigen Einzugsgebieten, welche am stärksten durch Starkniederschläge gefährdet sind, keine Messpegel des Abflusses vorhanden sind. Dies stellt ein großes Problem dar, da der größte Teil der hydrologischen Niederschlag-Abfluss Modelle anhand der lokalen Gegebenheiten und dem Abfluss kalibriert werden muss (Loritz, 2014). Eine Regionalisierung oder Übertragung der benötigten Parameter von einem naheliegenden Einzugsgebiet auf das Untersuchungsgebiet ist zwar möglich, aber mit großen Unsicherheiten belastet (Merz & Blöschl, 2008).

Aufgrund dieser Problematik hat sich die LUBW entschieden, dass die Professur für Hydrologie an der Universität Freiburg mit der Entwicklung eines unkalibrierten Niederschlag-Abfluss Modell beauftragt wird. Dieser Modelltyp benötigt keine Abflussdaten für die Kalibrierung des Modells, sondern leitet den Durchfluss direkt über die spezifischen Eigenschaften des Einzugsgebietes ab (Loritz, 2014). Dies stellt sowohl den großen Vorteil als auch Nachteil dieser Modelle dar, da eine nachträgliche Validierung und Evaluierung der Ergebnisse fast unmöglich sind.

Einleitung

Dies bedingt, dass ein unkalibrierte Modell einen großen Testlauf vor der flächendeckenden Anwendung durchlaufen muss. Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurde RoGeR lediglich in 13 bemessenen Untersuchungsgebieten in Baden-Württemberg angewendet und die Ergebnisse mit den gemessenen Niederschlag-Abfluss Ereignissen verglichen. Trotz vielversprechender erster Berechnungen wurden auch einige Probleme bei der Modellierung des Hydrographen und der Zusammensetzung der Abflusskomponenten festgestellt (Steinbrich et al., 2014 & 2016).

Um die Stärken und Schwächen des unkalibrierten Niederschlag-Abfluss Modells besser nachvollziehen zu können, wird die Anzahl der Untersuchungsgebiete in dieser Arbeit deutlich erhöht und eine ausführliche Evaluierung der Modellierungsergebnisse von RoGeR durchgeführt. Die bemessenen Einzugsgebiete sollen sich dabei über ganz Baden-Württemberg verteilen, um den landschaftstechnischen, pedologischen und geologischen Besonderheiten gerecht zu werden. Durch eine Kombination ausgewählter hydrologischer Methoden werden die Hydrographen von diversen Starkniederschlagsereignissen in ihre Abflusskomponenten aufgeteilt und mit den Ergebnissen von RoGeR verglichen. Dies wird für vier verschiedene Szenarien durchgeführt, um einen Vergleich für unterschiedliche Niederschlagsmengen und -dauern, sowie variierenden Vorfeuchtebedingungen zu erhalten.

2. Aktueller Wissensstand

2.1 Niederschlag-Abfluss Modelle

2.1.1 Kalibrierte Modelle

Als wichtigstes Werkzeug für die Erfassung und Vorhersage von Hochwasserereignissen wird die Niederschlags-Abfluss Modellierung eingesetzt und in weiten Teilen der Hydrologie angewandt (Loritz, 2014). Diese dient dazu, dass die Abflussdynamik eines Einzugsgebietes korrekt erfasst, Gebiete mit besonderer Überschwemmungsgefahr identifiziert und entsprechende Bemessungswerte für die Planung von wasserwirtschaftlichen Anlagen ermittelt werden (Klaffl, 2011).

Die hydrologischen Modelle können dabei nicht direkt in jedem beliebigen Gebiet eingesetzt, sondern müssen zuerst durch eine Kalibrierung der einzelnen Modellparameter angepasst werden. Die Kalibrierung erfolgt häufig mit gemessenen Abflussdaten von einer oder mehreren Messstationen eines Einzugsgebietes (Loritz, 2014; Steinbrich et al., 2016). Die Qualität der Ergebnisse der "Niederschlags-Abfluss Modelle hängt deshalb sehr stark von den gemessenen Felddaten ab" (Steinbrich et al., 2016: 12, eigene Übersetzung), weshalb der präzisen Abflussbestimmung in einem Einzugsgebiet eine besondere Bedeutung zukommt.

In den meisten deutschen Einzugsgebieten, welche größer als 10 km² sind, werden schon seit langer Zeit kontinuierliche Abflussmessungen durchgeführt. Diese große Datengrundlage erlaubt es extremwertstatistische Abschätzungen durchzuführen und die erwarteten Hochwasserscheitel zu simulieren. Außerdem können Hochwassergefahrenkarten erstellt werden, woraus sich relevante Schutzmaßnahmen ableiten lassen (Steinbrich et al., 2015).

In vielen kleineren Einzugsgebieten in Deutschland stehen meistens gar keine oder nur unzureichende Messzeitreihen zur Verfügung. Auch weltweit ist nur ein Bruchteil der Einzugsgebiete mit Messsystemen ausgestattet oder intensiver untersucht worden (Klaffl, 2011; Loritz, 2014). Dies verdeutlicht ein zeitliches Problem bei der Abflussmodellierung. Der Messzeitraum muss groß genug sein, um die gesamte Abflussvariabilität eines Einzugsgebietes erfassen zu können. Wenn die Zeitreihen nur einen kurzen Bereich der möglichen Abflussdynamik abdecken, z.B. eine längere Trockenphase oder besonders regenreiche Jahre, kann die Modellierung die Realität nur unzureichend wiedergeben und Vorhersagen sind mit großen Unsicherheiten belastet. Außerdem können spezielle Gebietsparameter genauer abgeschätzt werden je länger die vorhandenen Messdaten sind (Merz et al., 2009).

Des Weiteren ist es wichtig, dass ein Einzugsgebiet das Kriterium der Stationarität erfüllt. Dies ist jedoch durch Landnutzungsänderungen oder wasserbauliche Eingriffe, welche das hydrologische Regime verändern, oftmals nicht gegeben (Klaffl, 2011). Dumanski et al. (2015) fanden in einer Studie heraus, dass der jährliche Abfluss, die Abflusskoeffizienten und die -spitzen sich während eines Ereignisses in den kanadischen Grasebenen deutlich erhöht haben. Dies wurde durch die Trockenlegung

von Teichen und Mooren ausgelöst, welche fortan als Ackerland und Weiden genutzt wurden. Ähnliche Umbrüche, welche beispielhaft durch die Rheinbegradigung und Trockenlegung von Mooren und Feuchtflächen im Schwarzwald beschrieben werden können, dürften auch in Baden-Württemberg zu beobachten sein. Eine Kalibrierung der Niederschlags-Abfluss Modellparameter ist durch solche Faktoren nur unzureichend möglich.

2.1.2 Regionalisierung

Eine Möglichkeit diese Probleme zu umgehen liegt in der Regionalisierung der Modellierung. Dabei wird versucht "Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Modellparametern und physikalischen Einzugsgebietseigenschaften finden" (Loritz, 2014: 1). Über verschiedene zu Regionalisierungsverfahren und aufgrund der physikalischen Gegebenheiten können die zu kalibrierenden Parameter des bemessenen auf das ungemessene Einzugsgebiet übertragen werden (Loritz, 2014; Merz & Blöschl, 2008). Ein häufig verwendeter Ansatz ist das "Hydrological Response Units' (HRU) Konzept. Dabei wird das Einzugsgebiet in mehrere Bereiche aufgeteilt, welche sich hydrologisch ähnlich bzw. identisch verhalten sollen. Die Einteilung erfolgt aufgrund von klimatischen, topographischen, bodenkundlichen, geologischen und landnutzungstechnischen Parametern (Kumar et al., 2013; Parajka et al., 2006). Als Beispiel hierfür kann die Bestimmung des Bemessungsniederschlages für ein zu untersuchendes Einzugsgebiet genannt werden. Dieser kann aus Niederschlags-Intensitäts Diagrammen, Dauer-Intensitäts Diagrammen oder über Hüllkurven abgeleitet werden (Merz, 2006). Parajka et al. (2007) haben eine Methode entwickelt, die sowohl lokale Einzugsgebietseigenschaften als auch Verteilungen verschiedener Parameter, welche aus einer großen Anzahl von Einzugsgebieten abgeleitet werden, berücksichtigt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Modellierungsgenauigkeit im Vergleich zu anderen Regionalisierungsverfahren leicht erhöht wurde.

Wagener et al. (2007) beschreiben ebenfalls die Regionalisierung von Kenngrößen zwischen bemessenen und unbemessenen Gebieten. Einerseits stehen dafür hydroklimatischen Faktoren zur Verfügung, welche durch den Niederschlag, die Verdunstung oder die Wasserbilanz charakterisiert sind. Andererseits kann die funktionale Reaktion eines Einzugsgebiets für die Regionalisierung verwendet werden. Dazu kann das Abflussverhalten, welches stark durch den Abflusskoeffizienten bestimmt wird, oder die Speichereigenschaften des Untersuchungsgebiet verwendet werden. Diese können durch geologische oder bodenkundliche Abschätzungen charakterisiert werden.

2.1.3 Unkalibrierte Modelle

Anstatt den gemessenen Abfluss eines naheliegenden Einzugsgebietes über die Eigenschaften des zu analysierenden Untersuchungsgebietes zu modifizieren und zu übertragen, kann der Abfluss auch direkt über die Gebietseigenschaften des Untersuchungsgebietes abgeleitet werden. Dieser Ansatz wird als unkalibriertes Niederschlags-Abfluss Modell bezeichnet. Zu den genutzten Faktoren zählen z.B. gemessene Bodenparameter, geologische, topographische und landnutzungstechnische Daten (Loritz, 2014). Als weitere wichtige Eingangsgröße dient der Niederschlag, da aus diesem der Zusammenfluss des Abflusses berechnet wird. Eine Kalibrierung des Modells ist dabei nicht erforderlich, jedoch können die einzelnen Parameter abschließend nicht anhand des gemessenen Abflusses auf ihre Richtigkeit überprüft werden. Dies stellt einen großen Nachteil der unkalibrierten Modelle dar, da alle Abflussprozesse korrekt erfasst und über diverse Parameter ableitbar sein müssen, damit die Ergebnisse korrekt modelliert werden (Loritz, 2014).

Als Beispiel für ein unkalibriertes Niederschlag-Abfluss Modell kann das Verfahren nach Lutz genannt werden. Dieses ist in der Lage über die Klassifizierung der Landnutzung und versiegelten Flächen einen Abflussbeiwert für das Einzugsgebiet zu bestimmen. Damit können für verschiedene Niederschlagshöhen der Direktabfluss und eine Quantifizierung der Abflussspitze durchgeführt werden. Das SCS-CN Verfahren, welches in den USA entwickelt wurde, geht nach einem ähnlichen Prinzip vor und liefert einen Abflussbeiwert für verschiedene Landnutzungen und Einzugsgebiete (Merz, 2006). Die große Schwäche dieser Verfahren liegt an dem konstanten Abflussbeiwert, da die Niederschlagsverteilung und Bodenfeuchte keine Berücksichtigung erfahren. Eine Evaluierung und Validierung sind bei diesen Verfahren nur unzureichend möglich und die Ergebnisse der Modellierung müssen mit Vorsicht betrachtet werden. Merz & Blöschl (2008) und Wagener & Montanari (2011) hoben in ihren Studien außerdem die wichtige Rolle des Prozessverständnisses für unbemessene Einzugsgebiete hervor. Durch hydrologisches Prozessverständnis kann das Verhalten eines Einzugsgebietes bei Hochwasserereignissen mit wenigen Informationen bereits gut abgeschätzt werden.

2.2 Starkniederschläge

2.2.1 Entstehung und Auftreten

"Angaben über die Eintrittswahrscheinlichkeit von Starkniederschlagshöhen werden u.a. für die Bemessung von wasserwirtschaftlichen Anlagen – angefangen von Stadtentwässerungssystemen bis hin zu Talsperren – benötigt" (Malitz & Ertel, 2015: 3). Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist dabei nur schwer zu quantifizieren, da kurze Starkniederschläge mit hohen Intensitäten meist durch konvektive Ereignisse entstehen. Diese sind durch warme Luftmassen geprägt, welche durch kleinräumige Aufwindgebiete und Dichteunterschiede zu einem sehr schnellen Aufstieg gezwungen werden. Sobald das Kondensationsniveau erreicht ist, bilden sich Wolken und es kann zu starken Niederschlägen mit Hagel und Sturmböen kommen. Gewitterwolken entstehen meist an heißen Sommertagen, da die Luftmassen zu diesem Zeitpunkt sehr warm und leicht sind. Die einzelnen Gewitterzellen haben meist eine Lebensdauer zwischen 30 und 60 Minuten und eine sehr kleine räumliche Ausdehnung, weshalb sie ein nur schwer zu kalkulierendes Überschwemmungsrisiko darstellen (Klose, 2008; LUBW, 2016).

"Starkregen sind gekennzeichnet durch extrem kurze Vorwarnzeiten sowie eine unsichere Warnlage und wirken sich zum Teil außerhalb und unabhängig von Gewässern aus" (LUBW, 2016: 7). Dies führt dazu, dass alle Regionen in Baden-Württemberg potenziell von Starkregen betroffen sein können.

Gottschalk & Weingartner (1998) konnten zeigen, dass die Niederschlagsmengen einer Gammaverteilung folgen, welche durch viele kleine Niederschlagssummen und wenige starke Niederschlagsereignisse charakterisiert ist. Auch räumlich unterscheiden sich die Niederschlagsvolumina deutlich. Für die flachen Gebiete des Tieflandes und den alpinen Bereichen in der Schweiz weisen die Niederschlagsvolumina eine nur geringe Variabilität auf. In den voralpinen Zonen besitzen die Niederschläge eine höhere Variabilität mit besonders starken Ereignissen.

Tramblay et al. (2011) fand außerdem heraus, dass eine hohe Dichte von Niederschlagssammlern die Niederschlagsverteilung eines Einzugsgebiets genauso gut oder besser repräsentieren kann wie die Daten eines Niederschlagsradars. Dies liegt an der Größe der Rasterfelder, die einem großen Bereich eines Einzugsgebietes den gleichen Wert zuordnen. Diese Unsicherheiten des Radars, welche durch den Höhengradient oder andere topographische Effekte verursacht werden, können durch eine Interpolation zwischen den einzelnen Niederschlagsstationen deutlich verringert werden. Es sollte jedoch in jedem Fall eine räumliche Differenzierung des Niederschlages durchgeführt werden, da dies die Modellierungsergebnisse maßgeblich verbessert. Dies wurde auch durch Villanueva et al. (2012) bestätigt. Diese bewiesen, dass der zeitliche Verlauf, die räumliche Verteilung und die Bewegungsrichtung eines Gewitters einen großen Einfluss auf die Abflussbildung besitzen.

2.2.2 Saisonalität

Sivapalan et al. (2004) und Tarasova et al. (2018) fanden heraus, dass die Jahreszeiten einen großen Einfluss auf die Abflussbildung besitzen. In den Wintermonaten werden Abflussereignisse häufig durch langanhaltende Niederschläge oder Schneeschmelzereignisse bestimmt. Die Sommermonate werden durch konvektive Starkniederschläge mit hohen Intensitäten dominiert. Hochwasserereignisse im Sommer werden deswegen durch eine kurze Dauer mit einem schnellen Anstieg und Abfall des Hydrographen geprägt (Sivapalan et al., 2004).

Zudem zeigte Sivapalan et al (2004), dass die Verdunstung in den Sommermonaten höher und dadurch bedingt die Bodenfeuchte niedriger ist als in den Wintermonaten. Dies führt dazu, dass die Hochwasserereignisse im Sommer durch andere Abflussprozesse ausgelöst und dominiert werden als im Winter. Auch Patil & Stieglitz (2010) bestätigten den dominierenden Einfluss der Verdunstung auf die Abflussbildung in den Sommermonaten.

2.2.3 Klimawandel

In einer Studie zur zukünftigen Entwicklung von Starkniederschlägen haben van den Besselaar et al. (2013) herausgefunden, dass Starkniederschlagsereignisse in vielen Regionen Europas zunehmen werden. Dies trifft sogar auf Gebiete zu, die in der Summe mit einer geringeren Niederschlagsmenge zu rechnen haben. Die verstärkte Intensität von Starkniederschlägen wird dabei durch die erhöhte Temperatur, welche zu einer verstärkten Verdunstung führt, begünstigt. Dies bedingt einen höheren Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre (LUBW, 2016). Außerdem hat Mitchell (2003) hervorgehoben,

dass das Potenzial von zukünftigen Flutereignissen durch die verstärkten Niederschläge weiter ansteigen wird, wodurch mit größeren Schadenssummen und Gefahren zu rechnen ist.

Zusätzlich verändert sich das zeitliche Auftreten von Überflutungsereignissen. Durch die erhöhten Temperaturen können sogenannte "Rain on Snow" Ereignisse im Winter häufiger auftreten und die Schneeschmelze setzt früher ein. Aber auch Starkniederschlagsereignisse können durch die erhöhten Temperaturen früher und länger im Jahr vorkommen (Blöschl et al., 2017). Dumanski et al. (2015) konnten außerdem eine Verschiebung der Niederschlagsform nachweisen. Dies bedeutet, dass Niederschlagsereignisse im Winter häufiger werden und weniger Niederschlag als Schnee fällt.

Berghuijs et al. (2016) fanden heraus, dass die Bodenfeuchte in einigen Gebieten Süddeutschlands sehr sensitiv auf Klimaveränderungen reagiert. Durch die verringerte mittlere Bodenfeuchte wird der Abfluss in diesen Gebieten ebenfalls abnehmen. Dies gilt jedoch nicht für Hochwasserereignisse, welche auf dem gleichen Niveau bleiben oder leicht ansteigen werden.

2.3 Abflussbildungsprozesse

In Abbildung 2.1 sind die dominierenden Abflussprozesse eines Einzugsgebiets dargestellt. Der herabfallende Niederschlag kann durch die vorhandene Vegetation eines Standortes als Interzeption zurückgehalten werden und zu einem späteren Zeitpunkt verdunsten oder von den Pflanzen aufgenommen werden. Der verbleibende Niederschlag wird als Effektivniederschlag bezeichnet und steht für fortschreitende Abflussbildungsprozesse zur Verfügung.

2.3.1 Oberflächenabfluss

Der Horton'sche Oberflächenabfluss (HOF) entsteht auf versiegelten oder verdichteten Bereichen, auf welchen die Infiltrationsfähigkeit der Böden nicht ausreicht um die vorhandene Niederschlagsintensität aufzunehmen. Sättigungsoberflächenabfluss (SOF) entsteht meist in gewässer- oder grundwassernahen Bereichen. Dabei steigt der Bodenwassergehalt oder das Grundwasser soweit an bis die Bodenoberfläche erreicht ist und der nachfolgende Niederschlag oberflächlich abfließen muss. Sowohl der Horton'sche als auch der Sättigungsoberflächenabfluss tragen als Direktabfluss zu einer schnellen Gebietsreaktion bei einem Niederschlagsereignis bei (Dyck & Peschke, 1995; LUBW, 2016)).

2.3.2 Infiltration

Die Infiltration wird als "Eintritt des Wassers in den Boden durch dessen Oberfläche" definiert (Dyck & Pescke, 1995: 368) und kann auf mehreren Wegen geschehen. Die Primärporen bedingen die Matrixinfiltration des Niederschlages auf der gesamten Fläche des Einzugsgebietes. Diese setzen sich aus Mikro- und Mesoporen zusammen, welche eine geringere Infiltrationsleistung als die Makroporen besitzen. Die Makroporen, welche auch als Sekundärporen bezeichnet werden, entstehen aus abgestorbenen Wurzeln, durch tierische Aktivitäten (Regenwürmer) oder durch Schrumpfungsrisse

(Amelung et al., 2018; Dyck & Peschke, 1995;). Makroporen spielen für die Infiltration und die effiziente Verteilung des Wassers im Boden eine wichtige Rolle (Faeh et al., 1997; Scherrer, 2006). Die Makroporen können dabei eine Länge von bis zu drei Metern erreichen. Faeh et al. (1997) konnten außerdem zeigen, dass die Anzahl, sowie der Durchmesser der Makroporen und damit bedingt der Durchfluss durch die Makroporen mit der Tiefe variiert.

Die Infiltrationsleistung der Böden kann durch verschiedene Faktoren weiter erhöht werden. Dazu zählen die Schrumpfungsrisse, welche auf lehmigen und tonhaltigen Böden entstehen können. Dies führt dazu, dass das Wasser größtenteils durch die Schrumpfungsrisse in den Boden infiltriert und nicht durch die Bodenmatrix. Zhu et al. (2018) konnten nachweisen, dass Schrumpfungsrisse die Abflussreaktion eines Einzugsgebietes verlangsamen und der oberflächlich abfließende Wasseranteil deutlich reduziert wird. Bei ansteigender Bodenfeuchte kann sich zudem ein präferenzielles Fließsystem ausbilden.

Die Infiltrationsleistung der Böden kann durch Verschlämmungsprozesse aber auch verringert werden. "Unter Verschlämmung versteht man das Zerfließen des Bodens aufgrund des Niederschlags" (Scherrer, 2006: 13). Dies kann bei einem hohen Wassergehalt des Bodens und einer geringen Gefügestabilität oder durch die Aufprallwucht der Tropfen bei einem Starkniederschlag ausgelöst werden, wodurch wichtige Strukturelemente des Bodens (z.B. Makroporen und Bodenaggregate) zerstört werden (Scherrer, 2006).

Auch die Hydrophobizität kann die Infiltrationsleistung deutlich verringern. Dies kann durch stark ausgetrocknete Böden, wobei die Bodenfeuchte unter einen bestimmten Grenzwert fällt, oder abgebaute organische Materie bedingt werden. Auch Waldbrände können zu einer Hydrophobizität der Böden führen. Dies führt zu einer wasserabweisenden Oberfläche, über welche das Wasser nicht infiltrieren kann und stattdessen oberflächlich abfließen muss (Scherrer, 2006; Zehe et al., 2007).

2.3.3 Zwischenabfluss

Der Zwischenabfluss oder "Subsurface Flow" (SSF) entsteht als "bodeninnerer lateraler Abfluss bei geschichteten Böden und Bodensättigung" (Dyck & Peschke, 1995: 213). Dieser trägt als verzögerter Direktabfluss zu einem Abflussereignis bei. SSF kann sowohl durch geologische als auch pedologische Ursachen bedingt sein. Der SSF, welcher durch die Geologie eines Gebietes bestimmt wird, entsteht durch die höhere Durchlässigkeit des verwitterten Bodenmaterials im Vergleich zu dem darunter liegendem unverwittertem Gestein. Dadurch entsteht eine Stauschicht, die das Wasser lateral zum Hang abfließen lässt. Der gleiche Effekt kann durch Makroporen oder Pipes, welche z.B. von Regenwürmern oder Maulwürfen gegraben wurden, ausgelöst werden. Diese besitzen eine höhere Drainageleistung als das umliegende Material (Scherrer, 2006).

Bachmair & Weiler (2012) untersuchten den Einfluss der Vegetationsbedeckung und Landnutzung auf Zwischenabflussprozesse eines Hanges. Dabei zeigte sich nur ein geringfügiger Einfluss der einzelnen





Abbildung 2.1: Abflussbildungsprozesse eines Einzugsgebietes (Steinbrich et al., 2016).

2.3.4 Tiefenperkolation und Basisabfluss

Die Tiefenperkolation (TP) beschreibt "den Wasserverlust eines Bodens unter dem Einfluss der Schwerkraft" (Amelung et al., 2018: 298). Das Wasser versickert durch den Bereich der ungesättigten Bodenzone, welche nicht durch Verdunstungsprozesse oder die Pflanzenaufnahme beeinflusst wird, bis die Grundwasseroberfläche erreicht ist.

Für den Basisabfluss (BF) liegt eine große Anzahl an Definitionen vor. In dieser Arbeit wird der Basisabfluss als Anteil des Gesamtabflusses definiert, welcher durch die Exfiltration des Grundwassers eines Aquifers in den Vorfluter beschrieben wird. Das Grundwasser wird dabei lediglich durch die Tiefenperkolation von Niederschlägen wieder aufgefüllt (Dyck & Peschke, 1995).

Eine weitere Definition für den Basisabfluss wird durch den Anteil des Gesamtabflusses, welcher nicht durch Ereigniswasser beeinflusst ist, beschrieben. Ereigniswasser ist dabei als Wasser definiert, das als

Horton'scher oder Sättigungsoberflächenabfluss, sowie als schneller Zwischenabfluss zu einem Abflussereignis beiträgt (Blume et al., 2007; Chapman, 1999).

2.4 Beeinflussende Faktoren auf die Abflussbildung

2.4.1 Vorfeuchte

Aus welchen anteiligen Abflussprozessen sich der Gebietsabfluss eines Einzugsgebietes zusammensetzt hängt neben der Niederschlagsintensität und -summe auch stark von der Bodenfeuchte ab, weshalb diese eine wichtige Rolle für die Niederschlags-Abfluss Modellierung spielt.

Die Bodenfeuchte ist das Resultat aus der Niederschlagssumme abzüglich des Verlustes durch Pflanzen und Verdunstung. Tramblay et al. (2010) hoben in einer Studie die Bedeutung der Bodenfeuchte für die Abflussbildung hervor, indem sie die Abflussbildung in einem Einzugsgebiet mit fünf verschiedenen Ansätzen zur Berechnung der Bodenfeuchte durchführten. Trotz gleicher Eingangsdaten kamen die verschiedenen Methoden auf unterschiedliche Ergebnisse, welche zu starken Abweichungen der Hydrographen führten. Diese betreffen den zeitlichen Verlauf, die Verzögerung der Abflussbildung und die Abflusspitzen.

McGlynn et al. (2004) fanden in einer Studie heraus, dass bei einer geringen Vorfeuchte und niedrigeren Grundwasserständen ein kleinerer Teil eines Einzugsgebietes zur direkten Abflussbildung beiträgt. Dies trifft vor allem auf die flussnahen Auenbereiche zu, welche nur bei hohen Grundwasserständen zur Abflussbildung beitragen. Die Bodenvorfeuchte spielt jedoch nicht nur eine wichtige Rolle für die absolute Menge an Zwischenabfluss im Boden, sondern beeinflusst auch die Geschwindigkeit des Abflusses. Dies wurde von Anderson et al. (2009) ausführlich untersucht. Durch eine hohe Bodenfeuchte kann präferentielles Fließen im Boden auftreten. Dieses wird durch die gute Konnektivität der Makroporen ausgelöst und führt dazu, dass auch die Hangbereiche bei einer hohen Vorfeuchte durch den SSF zu einer schnellen Reaktion des Einzugsgebietes beitragen. Bei einer geringen Vorfeuchte ist die Abflussreaktion zeitlich stark verzögert und gedämpft. Dies wurde ebenso durch Wiekenkamp et al. (2015) bestätigt, welcher Untersuchungen in einem bewaldeten und bergigen Einzugsgebiet in Deutschland durchführte.

2.4.2 Abflusskoeffizient

Der Abflusskoeffizient oder -beiwert ist ein in vielen Bereichen genutzter Parameter der Hydrologie. Er ist definiert als das "Verhältnis des direkten Abflusses zum Niederschlag" (Dyck & Peschke, 1995: 365). Die Berechnung kann dabei für einzelne Ereignisse oder Jahre, aber auch für den gesamten Messzeitraum durchgeführt werden (Blume et al., 2007). Yadav et al. (2007) konnten einen starken Einfluss des Abflusskoeffizienten auf das Abflussverhalten eines Einzugsgebietes nachweisen.

Blume et al. (2007) verglichen fünf verschiedene Methoden zur Bestimmung der Abflusskoeffizienten. Die verwendeten Methoden reichten von sehr einfachen Ansätzen bis zu physikalischen Modellen.

Aktueller Wissensstand

Dabei zeigten sich große Unterschiede bei den Ergebnissen, wobei nicht ersichtlich ist, welcher Ansatz die realitätsnahesten Ergebnisse liefert. Die verwendete Methode kann dabei nach den Eigenschaften eines Einzugsgebiets und der vorhandenen Datengrundlage variieren.

Merz et al. (2006) und Merz & Blöschl (2009) analysierten die Abflusskoeffizienten von mehr als 50.000 Abflussereignissen in 337 Einzugsgebieten in Österreich. Dabei konnten sie nachweisen, dass die Abflussbeiwerte stark mit den Niederschlagsmengen und -intensitäten zusammenhängen. Der Niederschlag wiederrum hängt von der räumlichen Lage und Topographie der Einzugsgebiete ab. Auch die Bodenfeuchte vor einem Niederschlagsereignis spielt eine entscheidende Rolle für den Abflusskoeffizienten. Der Bodentyp und die Landnutzung besitzen nur eine untergeordnete Kontrolle für die Abflussbildung. Dies indiziert, dass die Abflussbildung in Österreich stark durch die klimatischen Verhältnisse und jahreszeitliche Wasserbilanz geprägt ist.

Villanueva et al. (2012) konnten zeigen, dass die Abflusskoeffizienten von Einzugsgebieten im Südwesten Deutschlands bei starken Gewittern und Sturzfluten einen Wert von 20% meist nicht überschreiten. Dies legt die Möglichkeit eines maximalen Grenzwertes für den Abflusskoeffizienten nahe, da dies auch bei hohen Vorfeuchtebedingungen zutrifft.

Zehe et al. (2005) konnten zeigen, dass es einen Grenzwert der Bodenfeuchte gibt, ab welchem die Abflusskoeffizienten eines Einzugsgebiets stark ansteigen. Dieser hängt sehr stark mit dem räumlichen Muster, der Dichte und den Durchmessern von Makroporen zusammen, welche den Zwischenabfluss und Oberflächenabfluss bestimmen. Dies konnte durch James & Roulet (2007), welche Untersuchungen in bewaldeten Einzugsgebieten durchgeführt haben, bestätigt und ergänzt werden.

Den Abflussbeiwert eines Einzugsgebietes zu bestimmen kann sich schwierig gestalten, da viele Parameter einen Einfluss besitzen. Aus diesen Gründen entwickelten Markart et al (2006) eine Geländeanleitung, welche es ermöglicht, den Oberflächenbeiwert direkt im Gelände abschätzen zu können. Dabei werden lokale Gebietsparameter wie Topographie, Bodenkennwerte, Vegetation und weitere Besonderheiten des Gebietes verwendet. Auch Wessolek et al. (2009) beschreiben ausführlich die Ableitung von Bodenkenngrößen, wie die Feldkapazität und Wasserleitfähigkeit der Böden im Gelände, wozu auch der Abflusskoeffizient zählt. Scherrer & Naef (2003) experimentierten mit Entscheidungsschemata, die als Maß für die verschiedenen Abflussprozesse in einem Gebiet dienen sollten. Durch eine Geländebegehung und einige wichtige Faktoren der Einzugsgebiete konnte der Abflusskoeffizient und alle damit verbundenen Prozesse abgeschätzt werden.

Gottschalk & Weingartner (1998) konnten außerdem zeigen, dass die Verteilung der Abflusskoeffizienten einer Beta Funktion folgt. Dabei zeichnen sich vor allem die alpinen Gebiete und Regionen des Tieflandes durch geringe Abflusskoeffizienten zwischen 0 und 0,3 aus. In den voralpinen Regionen liegen die Abflusskoeffizienten meist deutlich höher mit Maxima von 0,8.

2.4.3 Topographie und Bodenmächtigkeit

Tarascova et al. (2018) konnten in einer Studie zeigen, dass die räumliche Lage und Topographie einen wichtigen Einfluss auf die Abflussbildung besitzen. Die Abflussbildung in Flachlandgebieten, welche eine größere Bodenmächtigkeit und Speicherkapazität besitzen, wird stark durch die Bodenfeuchte vor einem Niederschlagsereignis dominiert. Eine höhere Bodenfeuchte führt in diesen Gebieten zu geringfügig höheren Abflusskoeffizienten und zu einer geringfügig stärkeren Abflussreaktion des Einzugsgebietes. Für hügelige bzw. bergige Einzugsgebiete mit geringeren Bodenmächtigkeiten und Speicherkapazitäten steigen die Abflusskoeffizienten mit zunehmender Bodenfeuchte schnell und stark an. McGlynn et al. (2004) hoben zudem hervor, dass solche Einzugsgebiete durch die Niederschlagsintensität dominiert werden. Diese bestimmt den Anteil an Horton'schem Oberflächenabfluss, Sättigungsflächenabfluss und Zwischenabfluss. Je höher die Intensität, desto stärker tragen diese Prozesse zu einer schnellen Abflussbildung bei.

Yadav et al. (2007) konnten nachweisen, dass die Topographie, die geologischen bzw. bodenkundlichen Kennwerte und vor allem die klimatischen Faktoren, welche z.B. über einen Feuchtigkeitsindex beschrieben werden können, den größten Einfluss auf den Abfluss besitzen. Der Feuchtigkeitsindex stellt dabei das Verhältnis des Niederschlages (P) zur potentiellen Evapotranspiration (PE) des Einzugsgebietes dar.

$$P/PE = \frac{P}{PE} \tag{1.}$$

Die Böden und Geologie wirken sich dabei vor allem auf den Basisabfluss aus, welcher einen wichtigen Einfluss für die untersuchten Einzugsgebiete in Großbritannien besitzt.

2.5 Auftrennung der Abflusskomponenten

Der hydrographische Verlauf des Abflusses an einem Pegel spiegelt die gesamte Reaktion eines Einzugsgebietes für ein Niederschlagsereignis wider. Sollen auch die einzelnen Abflusskomponenten und Speichersysteme oder die Verweilzeiten eines Einzugsgebietes bestimmt werden, müssen weitere hydrologische Methoden angewandt werden.

2.5.1 Oberflächen- und Zwischenabfluss

Eine Möglichkeit zur Abflusskomponentenauftrennung besteht in dem Einsatz von natürlichen oder künstlichen Isotopen und Tracern. Capell et al. (2012) benutzte Isotopendaten von Deuterium, um das Einzugsgebiet North Esk (Australien) in zwei unterschiedlich reagierende hydrologische Einheiten zu unterteilen. Der untere Bereich des Einzugsgebietes war durch ein großes Aquifersystem mit langen Verweilzeiten und einer starken Dämpfung des Isotopensignales charakterisiert. Der bergige Teil des Einzugsgebietes war durch kleine Speichersysteme und eine schnelle Abflussreaktionen auf Niederschlagsereignisse, welche durch den großen lateralen Makroporenfluss bedingt wurden, definiert.

Hoeg et al. (2000) versuchten in dem Einzugsgebiet des Zastler Baches (Deutschland) eine Drei-Komponentenseparation des Hydrographen, wofür sie ¹⁸O Isotope und gelöstes Silizium verwendeten. Die Sauerstoffisotope wurden für eine Quantifizierung des Niederschlagsanteils und die Siliziumdaten für die Verweilzeit des Wassers im Boden und Gestein genutzt. Dadurch konnten schnelle, mittlere und langsame Abflusskomponenten identifiziert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Isotopen- und Tracermethoden mit teilweise großen Messunsicherheiten belastet sind, da die Konzentrationen sehr niedrig und schwierig nachzuweisen sind. Außerdem bedeutet jede Untersuchung einen großen feldmesstechnischen Aufwand und wurde nur in wenigen Gebieten angewandt. Es liegen deswegen weltweit keine flächendeckenden Informationen vor, welche für eine Analyse verwendet werden könnten.

2.5.2 Basisabfluss

Eine weitere Möglichkeit zur Separation von Abflusskomponenten besteht in der Bestimmung des Basisabflusses. Dafür wird der Abfluss in den Basisabfluss und das Ereigniswasser aufgeteilt. Der Basisabflussindex (BFI) stellt das Verhältnis des Basisabflusses am Gesamtabfluss für ein einzelnes Ereignis oder einen längeren Zeitraum dar (Blume et al., 2007; Chapman, 1999).

Für die Basisabflusstrennung existieren diverse Methoden, welche ihre besonderen Stärken und Schwächen besitzen. Dazu gehören analytische Lösungen über verschiedene Gleichungen, welche das Auslaufverhalten eines Speichers charakterisieren sollen (Tallaksen, 1995). Auch empirische Verfahren finden häufig Anwendung. Dabei werden graphische Methoden oder digitale Filter verwendet, welche den Hydrographen eines Messpegels analysieren.

Eine häufig angewendete Methode stellt die ,constant k' Methode dar, welche von Blume et al. (2007) entwickelt wurde. Diese basiert auf der Annahme, dass der Grundwasseraquifer eines Einzugsgebietes einer linearen Funktion entspricht. Dies bedeutet, dass die Rezession des Hydrographen einen exponentiellen Verlauf besitzt. Der ,k Faktor' beschreibt dabei den Rezessionskoeffizienten, welcher ab einem gewissen Punkt konstant ist. Dies ist der Zeitpunkt, ab welchem der Abfluss des Einzugsgebietes nur noch durch den Basisabfluss gespeist wird. Mei & Anagnostuo (2015) haben die Methode weiterentwickelt und auf eine physikalischere Basis als die meisten genutzten Basisabflusstrennungsmethoden gebracht. Dabei wurden zusätzlich Niederschlagsdaten und verschiedene zeitliche Indizes integriert. Diese wurden für die Abtrennung der einzelnen Ereignisse verwendet.

Die jedoch am häufigsten verwendete Methode ist die UKIH Methode, welche am Institut für Hydrologie in Großbritannien entwickelt wurde und von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO, 2008) empfohlen wird. Dabei werden die täglichen Abflusswerte in nicht überlappende, 5-tägige Blöcke aufgeteilt. Aus diesen Blöcken werden die Minima für jeden Block ausgewählt. Ein Minimum wird dabei als Wendepunkt definiert, falls der Wert des Blocks multipliziert mit 0,9 kleiner ist als der Wert des vorherigen Blockes. Anschließend werden die Wendepunkte durch eine Linie miteinander

verbunden und für alle dazwischen liegenden Tage ein Basisabfluss bestimmt. Der Basisabfluss kann über das Aufsummieren der einzelnen Werte für die Dauer eines Ereignisses oder den gesamten Zeitraum abgeleitet werden. Der BFI kann abschließend als Differenz zwischen dem Basisabfluss zum Gesamtabfluss berechnet werden (WMO, 2008).

Die UKIH Methode besaß jedoch einige Schwächen, welche mittlerweile behoben wurden. Dazu zählte, dass der Basisabfluss den gemessenen Abfluss überschreiten konnte. Dies wurde durch die lineare Verbindung der Wendepunkte verursacht, welche keine ausreichende Flexibilität besaßen. Dies wurde von Piggott et al. (2005) durch eine Limitierung des Basisabflusses auf den gemessenen Gesamtabfluss behoben. Außerdem war die Methode sehr stark von der Wahl des Anfangspunktes der Zeitreihe dominiert, wodurch eine andere Wahl des Startpunktes zu unterschiedlichen Ergebnissen führte. Piggott et al. (2005) konnten dieses Problem lösen, indem sie die Segmentation des Abflusses relativ zu einem willkürlichen Startpunkt zwischen null und vier Tagen definierten und den Basisabfluss aus den Ergebnissen mittelten. Die UKIH Methode wurde außerdem nur für ganzjährig wasserführende Flüsse entwickelt. Dieses Problem wurde durch Aksoy et al. (2008) angepasst. Dabei wurden die Wendepunkte nicht nur aufgrund des vorherigen Blockes, sondern auch der nachfolgenden Blöcke angepasst. Erst wenn der mittige Block multipliziert mit 0,9 kleiner ist als der vorherige und nachfolgende Block wird ein Wendepunkt definiert.

Als großes Problem bei der Berechnung des Basisabflusses gilt weiterhin die Identifikation des Anfangsund Endzeitpunkts eines Niederschlagsereignisses. Vor allem das Ende eines Ereignisses zu quantifizieren stellt ein großes Problem dar. Dieses ist definiert als der Zeitpunkt, ab welchem der gesamte Abfluss aus Basisabfluss besteht und kein Ereigniswasser beinhaltet. Außerdem stellt die Interpolation des Basisabflusses zwischen dem Beginn und Ende eines Ereignisses eine Herausforderung dar, da die lineare Interpolation keine große Anpassungsfähigkeit besitzt (Blume et al., 2007).

Die UKIH Methode zur Basisabflussseparation wurde mehrfach modifiziert und für bestimmte Gegebenheiten angepasst. Beispielhaft hierfür wird die SARR Methode von Koskelo et al. (2012) genannt werden. Die SARR Methode verwendet statt der 5-tägigen Blöcke der UKIH Methode nur 2tägige Blöcke. Dies soll die schnellere Abflussdynamik für kleine Einzugsgebiete unter 50 km² besser wiederspiegeln, wodurch der Basisabflussanteil meist höher berechnet wird als bei der UKIH Methode. Außerdem werden Niederschlagsdaten des Einzugsgebietes verwendet, welche eine verbesserte Trennung der einzelnen Abflussereignisse ermöglichen. Dies zeigt sich vor allem durch eine schärfere Abtrennung bei mehreren kurz nacheinander folgenden Niederschlagsereignissen.

Die SARR Methode verdeutlichte den großen Einfluss der Blocklänge auf die Berechnung des BFI. Dies wurde von Stölzle et al. (unveröffentlicht) genutzt, um den ,delayed flow index' (DFI) zu entwickeln. Die Blocklänge, welche durch den Faktor ,n' beschrieben wird, spiegelt den Rückhalt und die Verzögerung eines Einzugsgebietes wider und hängt sehr stark von der Größe eines Einzugsgebietes ab.

Da der optimale Wert von "n" für ein zu untersuchendes Einzugsgebiet nicht bekannt ist, variiert die DFI Methode die Blocklänge zwischen einem und 90 Tagen. Dies führt zu charakteristischen Verzögerungskurven für ein Einzugsgebiet, welche in Abbildung 2.2 dargestellt sind. Stölzle et al. (unveröffentlicht) konnten deutlich zeigen, dass die Verzögerungskurven zwar kontinuierlich mit einer zunehmenden Blocklänge absinken, aber der Abfall nicht linear verläuft. Die Wendepunkte der Verzögerungskurve charakterisieren dabei das Einsetzen oder Aussetzen eines Speichersystems oder einer Abflusskomponente. Diese Methode kann dadurch für die Separation der einzelnen Abflusskomponenten genutzt werden. Dies kann sowohl für ein einzelnes Ereignis, für eine jahreszeitliche Saison oder den gesamten Zeitraum untersucht werden.



Abbildung 2.2: ,Delayed Flow Curves' für mehrere Einzugsgebiete in 4 unterschiedliche Niederschlagsszenarien und für das gesamte Jahr und Halbjahre aufgeteilt. Aus allen Gebieten wurde zudem eine Mittelung der DFI Kurven durchgeführt (Stölzle et al., unveröffentlicht).

2.6 Abflusstypen

Aus allen zuvor beschriebenen Prozessen und Faktoren führten Merz & Blöschl (2003) eine Analyse der Prozesse durch, welche ein Hochwasserereignis in Österreich auslösen können. Dabei unterschieden sie fünf verschiedene Arten von Hochwassern. Die erste Gruppe sind die "Flash Floods" oder Sturzfluten, welche durch sehr kurze, aber intensive Niederschläge ausgelöst werden. Die kurzen

Aktueller Wissensstand

Niederschläge sind die zweite Gruppe von Ereignissen, welche meist nur wenige Stunden andauern, eine mittlere Intensität besitzen und Teilbereiche eines Einzugsgebietes aufsättigen können. Lange Niederschlagsereignisse von mehreren Tagen stellen die dritte Hochwasserart dar und sind durch die Aufsättigung der Böden im gesamten Einzugsgebiet gekennzeichnet. Die vierte Gruppe sind die Schneeschmelzereignisse. Diese Ereignisse hängen stark von der Temperatur im Einzugsgebiet ab und die Böden im Untersuchungsgebiet sind bereits aufgesättigt. Als letzte Gruppe gelten die "Rain on Snow" Ereignisse, bei welchen bereits moderate Regenmengen zu großen Abflussmengen führen können.

Merz & Blöschl (2003) fanden des Weiteren heraus, dass die einzelnen Gruppen unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Mustern folgen. "Flash Floods' treten lediglich im Sommer auf, da diese durch konvektive Gewitter und hohe Temperaturen geprägt sind. .Rain Snow' on und Schneeschmelzereignisse können klimatisch bedingt lediglich in den Wintermonaten und im Frühjahr eines Jahres auftreten. Kurze und lange Niederschlagsereignisse können das ganze Jahr auftreten, aber finden gehäuft in den Sommer- und Herbstmonaten statt. Auch räumlich sind die verschiedenen Typen von Hochwasserereignissen eng mit der Topographie und Höhenstufe verknüpft. Diese haben einen maßgeblichen Einfluss auf den Typ und das zeitliche Auftreten eines Ereignisses.

In einer nachfolgenden Studie fanden Gaál et al. (2012) heraus, dass die Ereignisdauer von dem Typ des Abflussereignisses abhängt. "Flash Floods' führen zu kurzen Ereignisdauern mit wenigen Stunden. Lange Niederschlagsereignisse oder Schneeschmelzereignisse können jedoch mehr als 200 Stunden andauern. Dieser Effekt wird noch verstärkt, falls sich ein Einzugsgebiet in einer flachen Ebene mit tiefgründigen Böden befindet. An Hanglagen hingegen verringert sich die Ereignisdauer durch schnelle Abflussprozesse und flachgründige Böden. Merz & Blöschl (2009) konnten zeigen, dass die dynamischen Parameter eines Einzugsgebietes einen deutlich größeren Einfluss auf die Abflussbildung haben. Dazu zählten sie hydroklimatische Faktoren wie den Niederschlag, die Verdunstung und den Basisabfluss, aber auch die Abflusskoeffizienten und die Bodenfeuchte für einzelne Ereignisse. Die Böden, Geologie und Landnutzung spielen nur eine untergeordnete Rolle für die Abflussbildung.

Berghuijs et al (2016) untersuchten die abflussbildenden und hochwasserdominierenden Prozesse in den USA. Sie konnten dabei feststellen, dass die Infiltrationsleistung der Böden, welche eng mit der Vorfeuchte zusammenhängt, ein entscheidender Faktor bei Hochwasserereignissen in vielen Gebieten darstellt. Aber auch die kurzen "Flash Floods" und langanhaltenden Niederschläge spielen eine wichtige Rolle in weiten Teilen der USA. In gebirgigen Gebieten können außerdem Schneeschmelz- und "Rain on Snow" Ereignisse der entscheidende Faktor für die Hochwasserentstehung darstellen.

3. Problemstellung und Zielsetzung

Wie in Kapitel 1 bereits angedeutet wurde, liegt das Ziel dieser Arbeit im Vergleich der simulierten Hydrographen des Modells RoGeR mit den gemessenen Abflussdaten diverser Pegelstationen in Baden-Württemberg. Dies ist notwendig, da die Ergebnisse der Modellierung mit RoGeR zukünftig flächendeckend in Baden-Württemberg für die Erstellung von Starkniederschlagsgefahrenkarten eingesetzt werden sollen. Dies bedingt eine ausführliche Evaluierung und Überprüfung der Ergebnisse, da es sich bei RoGeR um ein unkalibriertes Niederschlag-Abfluss Modell handelt.

Die Modellierung mit RoGeR wurde bis zum jetzigen Zeitpunkt lediglich für 13 Einzugsgebiete in Baden-Württemberg durchgeführt, wobei RoGeR in vielen Untersuchungsgebieten vielversprechende Ergebnisse liefert und ein großes Potenzial offenbart. In einigen anderen Einzugsgebieten ergaben sich jedoch große Abweichungen zwischen den modellierten und gemessenen Ergebnissen. Um die Stärken und Schwächen des Modells RoGeR besser beleuchten zu können, wird die Anzahl der Untersuchungsgebiete in dieser Arbeit deutlich erhöht. Die Einzugsgebiete verteilen sich dabei über alle landschaftstechnischen, bodenkundlichen und geologischen Einheiten in Baden-Württemberg, damit Rückschlüsse über die Genauigkeit der Modellierung in den verschiedenen Bereichen von Baden-Württemberg erhalten werden können.

Des Weiteren soll sich diese Analyse nicht nur auf die quantitative Erfassung der Abflussmengen und spitzen, sowie dem qualitativen Verlauf des Hydrographen beschränken, sondern auch eine quantitative Analyse der einzelnen Abflusskomponenten liefern. Die Aufteilung des Hydrographen erfolgt hierbei in drei Komponenten, welche durch den Oberflächenabfluss, den Zwischenabfluss und den Basisabfluss charakterisiert werden. Dies stellt eine große Herausforderung in der Hydrologie dar, weshalb eine neue Methode zur Quantifizierung und Auftrennung der verschiedenen Abflusskomponenten angewandt wird. Diese wurde von Stölzle et al. (unveröffentlicht) von der Professur für Hydrologie an der Universität Freiburg entwickelt. Sie stellt eine Erweiterung der Basisabflusstrennung dar und wurde ursprünglich für die Abtrennung des Basisabflusses in Trockenperioden entwickelt. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit besteht deshalb in der Überprüfung der Einsatzmöglichkeiten dieser Methode für kurzfristige Hochwasserereignisse.

Die Auftrennung der Abflusskomponenten wird dabei für vier unterschiedliche Szenarien durchgeführt, welche sich durch eine Variation der Niederschlagsmenge, -dauer und den Vorfeuchtebedingungen auszeichnen. Die nachfolgende Analyse soll sich dabei auf die Abweichungen zwischen den einzelnen Szenarien fokussieren, um die Stärken und Schwächen von RoGeR für unterschiedliche Anfangsbedingungen zu erfassen. Dies stellt ein wichtiges Ziel dieser Arbeit dar, da sich daraus anschließende Verbesserungsvorschläge für die zukünftige Simulation mit RoGeR ableiten lassen.

4. Methoden und Vorgehensweise

4.1 RoGeR

4.1.1 Entwicklung RoGeR

Das Modell RoGeR wurde an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg entwickelt. Es ist ein "nicht kalibriertes Niederschlags-Abflussmodell, dass basierend auf den Geoinformationen in Baden-Württemberg die Abflussbildung und Konzentration flächendetailliert vorhersagt und darauf aufbauend die Hochwassergefährdung im Gerinne und auf der Landoberfläche prognostiziert" (Steinbrich et al., 2014: 4). Die dominierenden Abflussprozesse in Baden-Württemberg wurden in Abschnitt 2.3 ausführlich dargestellt. Diese wurden fast vollständig in RoGeR implementiert, um ein möglichst vollständiges Bild der Abflussprozesse wiedergeben zu können. Lediglich die Hysterese der Böden und die Hydrophobizität konnten aufgrund mangelnder Daten und der hohen Komplexität nicht verwendet werden.

Das Modell wurde in den letzten Jahren kontinuierlich weiterentwickelt und durch zusätzliche Funktionen und Abflussprozesse erweitert. Dazu zählt die Implementierung von Trockenrissen, welche einen großen Einfluss auf die Infiltrationsleistung der Böden haben (Steinbrich et al., 2014). Dies führte in vorherigen Modellierungen zu einer systematischen Überschätzung der Abflussmengen und -scheitel. Auch Torfböden stellten ein Problem dar, da bei der Modellierung große Mengen von Horton'schen Oberflächenabfluss gebildet wurden. Durch die großen Muldenspeicher und die hohe Matrixinfiltrationsraten, sowie die große Dichte an Makroporen erscheint dies als nicht angemessen. Diese Probleme wurden ebenfalls behoben. Zukünftig soll das Modell RoGeR ebenfalls in der Lage sein, eine Modellierung der Gerinnehydraulik berechnen zu können.

Ein weiteres großes Problem stellen die Niederschlagsdaten dar. Ein Vergleich der Stations- mit den RADOLAN Niederschlagsdaten zeigte große Unterschiede bei der Intensität der Niederschläge. Vor allem die kurzzeitigen Intensitätsspitzen werden deutlich unterschätzt, wodurch der Horton'sche Oberflächenabfluss die Realität nicht ausreichend abbildet (Steinbrich et al., 2014). Um diese Problematik zu lösen, wurde eine "besonders geeignete Methode entwickelt und daraus räumlich hochaufgelöste Starkregenmengen für verschiedene Dauerstufen abzuleiten" (Steinbrich et al., 2016: 5). Für das Verfahren wurden 346 Niederschlagsstationen, welche homogen über die Fläche und alle Höhenstufen in Baden-Württemberg verteilt sind, herangezogen. Das grundlegende Prinzip der Methodenentwicklung ist es "Informationen über Starkregenereignisse von benachbarten Stationen (Tochterstationen) auf die jeweilige Zielstation (Mutterstation) zu übertragen und damit die Zeitreihe der Mutterstation zu verlängern" (Steinbrich et al., 2016: 9). Die Niederschlagsstationen wurden dadurch auf eine vergleichbare Zeitlänge gebracht. Die Auswahl der Tochterstationen erfolgte durch ein höhengewichtetes Entfernungsmaß. Aus den Zeitreihen wurden die 2% der höchsten Niederschlagsereignisse ausgewählt. Dabei zeigte sich, dass die Paretoverteilung die Extremniederschläge am besten abbilden kann. Daraus wurden Intensitäts-Dauer Plots erstellt, welche
für verschiedene Jährlichkeiten bestimmt wurden. Diese Ergebnisse wurden für Baden-Württemberg flächendeckend interpoliert und dienen als Grundlage für die Korrektur der RADOLAN Daten (Steinbrich et al., 2016).

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellt außerdem regionalisierte Starkniederschlagshöhen zur Verfügung, welche über das Verfahren REGNIE (Regionalisierung von Niederschlagshöhen) berechnet wurden. Als Grundlage dienen tägliche Niederschlagshöhen seit 1951. Diese liegen in einem 1 km² Raster vor und sind dadurch deutlich besser aufgelöst als die RADOLAN Daten. Für kurze Starkniederschläge werden zeitlich hochaufgelöste 5-min Werte der Niederschlagshöhe verwendet (Malitz & Ertel, 2015).

4.1.2 Datengrundlage und GWN-BW

Das Modell RoGeR benötigt eine sehr große Menge an Daten, um seine Berechnungen durchführen zu können. Der Großteil der Daten kann aus dem Wasser- und Bodenatlas (WaBoA) Baden-Württemberg entnommen werden. Die Bodeninformationen stammen dabei aus der Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:200.000 (BÜK 200), welche mittlerweile durch die Bodenkarte im Maßstab 1:50.000 (BK 50) ersetzt wurde. Dies erlaubt eine genauere Modellierung, da auch kleinräumige geringdurchlässige Zwischenhorizonte oder Hangschuttmassen erfasst werden können. Die (hydro-) geologischen Daten werden von den (hydro-) geologischen Karten im Maßstab 1:50.000 (GK 50) abgeleitet. Die Landnutzungseinteilung entstammt den CORINE Satellitendaten von Europa, sowie topographischen Karten (TK) und Luftbildern. Die Höhenstufen und -einteilung wurde aus digitalen Geländemodellen (DGM) abgeleitet. Die Flächenversiegelung wird über das amtliche topographisch-kartographisches Informationssystem (ATKIS) bezogen. Diese Informationen liegen meist in einem 5x5 m Raster für ganz Baden-Württemberg vor (Steinbrich et al., 2014 & 2016).

Die Pegelstationen werden von der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) Baden-Württemberg betrieben, welche der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) unterstellt ist. Die Pegeleinzugsgebiete wurden mithilfe von Luftbildern, digitalen topographischen Karten und Geoinformationssystemen (GIS) erstellt. Nach dem gleichen Prinzip wurden die Seeflächen abgeleitet. Das Gewässernetz wird ebenfalls über digitale TK und DGMs kartographiert. Die Niederschlagsdaten stammen von den Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

Neben den Eingangsdaten des Niederschlages spielen auch die Vorfeuchte im Boden und die Grundwasserstände eine wichtige Rolle. Der zeitliche Verlauf des Bodenwasserhaushalts, die Sicherwasserbildung und die flächenhafte Grundwasserneubildung werden mit dem Modell GWN-BW modelliert. Die Ergebnisse dieser Modellierung liefern die Grundlage für die weitere konsistente Prozessbeschreibung und -berechnungen mit dem Modell RoGeR (Gudera & Morhard, 2015).

4.2 Gebietsauswahl

Für die Gebietsuntersuchung wurde der Großteil der Einzugsgebiete aus dem Abschlussbericht der Universität Freiburg für die LUBW (Steinbrich et al., 2016) in die Gebietsauswahl aufgenommen. Dies dient der weiteren Analyse dieser Gebiete mit besonderem Augenmerk auf den verschiedenen Abflussbildungsprozessen.

Die Auswahl der weiteren Einzugsgebiete erfolgte nach vielfältigen Kriterien. Als erstes wichtiges Kriterium dient die Lage der Einzugsgebiete. Diese sollen sich vollständig im Landesgebiet von Baden-Württemberg befinden, damit Probleme bei der Anforderung der Daten über Bundesland- bzw. sogar Staatsgrenzen hinweg wegfallen. Außerdem werden dadurch Ungenauigkeiten durch andere Messverfahren, zeitliche Auflösungen oder die Bearbeitung der Daten durch die zuständigen Behörden verringert.

Als nächstes Kriterium ist die Größe der Einzugsgebiete anzuführen. Die Einzugsgebiete sollen sich auf der Mesoskale befinden, welche in der Literatur meist zwischen 1-1000 km² definiert ist (Dvck & Peschke, 1995). Eine Größe von einem Quadratkilometer erschien für die Analyse als zu klein, da die Eingangsdaten meist einen Maßstab von 1:25.000 oder 1:50.000 besitzen. Dies bedeutet, dass ein Einzugsgebiet von einem Quadratkilometer lediglich durch 4-16 Rasterzellen repräsentiert wird. Dies erscheint deutlich zu grob aufgelöst, um die feinräumige Einzugsgebietsdynamik zu repräsentieren. Außerdem spielen physikalische Prozesse auf dieser Skala eine wichtigere Rolle als in größeren Einzugsgebieten. Die für die Analyse benötigten Parameter können meist nicht mit der benötigten Genauigkeit ermittelt werden und führen zu großen Unsicherheiten. Dies wurde auch in dem Abschlussbericht für die LUBW (Steinbrich et al., 2014) festgestellt. Für Kleinberegnungsversuche auf Flächen von wenigen Quadratmetern konnte die Abflussdynamik nur unzureichend wiedergegeben werden. Dies war vor allem für Waldböden der Fall. Es wurde deswegen eine untere Grenze von 5 km² festgelegt. Nach oben wurde eine Grenze von 100 km² gewählt, da diese Arbeit den Fokus auf Starkniederschlagsereignisse setzt und die zu untersuchenden Starkniederschlagsereignisse meist nur eine geringe räumliche Ausdehnung besitzen. Ein Starkniederschlag von wenigen Quadratkilometern kann in Teileinzugsgebieten eines großen Einzugsgebietes zu verheerenden Folgen führen, während hingegen an der Auslassstelle des Einzugsgebietes kaum eine Reaktion ersichtlich wird.

In einem weiteren Schritt wurden alle Einzugsgebiete, welche durch ein Hochwasserrückhaltebecken, eine Talsperre oder ein Staubauwerk beeinflusst sind, aus der Analyse ausgeschlossen. Dies liegt daran, dass das Modell RoGeR nicht in der Lage ist den künstlichen Gebietsrückhalt bzw. die Beeinflussung durch solche Bauwerke zu modellieren. Diese führen zu einer starken Veränderung des natürlichen Abflussregimes und verändern die natürlichen Schwankungen eines Einzugsgebietes. Außerdem liegen gerade für kleinere Bauwerke oftmals keine Daten zu den Füllständen oder Einsatzzeiten vor. In einem letzten Schritt wurden alle Gebiete, welche eine Seefläche von mehr als einem halben Quadratkilometer besitzen aus der Auswahl entfernt. Dies ist ebenfalls durch die Analysefähigkeiten des Modells RoGeR bedingt. Der große Speicherrückhalt eines Sees in Kombination mit der Verzögerung und Verlangsamung des Abflusses stellt noch eine zu große Herausforderung für die Modellierung dar. Außerdem liegen keine Messdaten über die Fließgeschwindigkeiten und Wasserstände in den meisten Seen vor, wodurch eine Analyse nur durch Schätzungen möglich wäre. Dies stellt für das Pegeleinzugsgebiet der Kanzach, welches durch den Einfluss des Federsees und des angrenzenden Niedermoores geprägt ist, ein großes Problem dar. Das Modell RoGeR konnte die "überaus gedämpfte Reaktion der beobachteten Abflussganglinie auf den Niederschlag" (Steinbrich et al., 2016: 68) nicht mit ausreichender Genauigkeit und nur mit einer großen zeitlichen Versetzung abbilden. Aus diesem Grund wurde das Einzugsgebiet der Kanzach, welches bereits in vorherigen Untersuchungen mit RoGeR analysiert wurde, aus der weiteren Analyse entfernt.

In einem letzten Schritt wurde eine visuelle Auswahl der zu untersuchenden Einzugsgebiete getroffen. Dabei wurden auch bodenkundliche und geologische Informationen, sowie Abschätzungen zu den vorherrschenden Abflussprozessen in die Auswahl einbezogen. Das Ziel bestand in einer homogenen Auswahl der Einzugsgebiete, wodurch alle naturlandschaftlichen Räume und Lagen in Baden-Württemberg ausreichend repräsentiert sind. Eine Übersicht der ausgewählten Einzugsgebiete für die Analyse befindet sich in Anhang I. Die Größe der Untersuchungsgebiete erstreckt sich über einen Bereich von 3,1 km² bis zu 123,4 km².

4.3 Messdaten

4.3.1 Datengrundlage

Für die Datenanalyse wurden Abfluss-, Niederschlags- und Schneedaten, sowie Informationen aus dem Wasser und Bodenatlas Baden-Württemberg verwendet.

Die Abflussdaten wurden von der LUBW in stündlicher Auflösung zur Verfügung gestellt. Die verfügbaren Daten lagen jedoch nur für 28 der 30 zur Untersuchung ausgewählten Gebiete vor, weshalb diese beiden aus der Analyse entfernt wurden. Die Abflussdaten der verbleibenden Gebiete beginnen meist zwischen 1968 und 1990. Lediglich das Gebiet Schwäbisch Gmünd besitzt erst ab dem Jahr 2002 Daten, da der Messpegel an einen anderen Standort verlegt wurde. Aufgrund der fehlenden Stationarität wurden die alten Abflussdaten nicht in die Analyse einbezogen. Die Datenreihen reichen bei fast allen Messstationen bis ins Jahr 2018. Einzelne Pegel wurden jedoch während einer Umstrukturierungsphase in den Jahren 2008 und 2012 stillgelegt.

Die Niederschlagsdaten stammen vom DWD und stehen im Internet zur freien Verfügung bereit. Um eine ausreichend hohe Repräsentation der Niederschlagsstationen für die Einzugsgebiete zu erreichen, wurden lediglich Messstationen innerhalb des Einzugsgebietes oder einem zehn Kilometer Radius

Methoden und Vorgehensweise

außerhalb des Einzugsgebietes für die Analyse genutzt. Dies führte dazu, dass für zwei weitere Untersuchungsgebiete keine Messdaten zur Verfügung standen. Diese Gebiete wurden deshalb ebenfalls aus der Analyse entfernt. Auch die Niederschlagsdaten besitzen eine zeitliche Auflösung von einer Stunde. Die hohe zeitliche Auflösung bedingt, dass für die meisten Einzugsgebiete erst Daten zwischen den Jahren 2004 und 2008 zur Verfügung stehen. Lediglich einzelne Messstationen besitzen Daten, welche vor dem Jahr 2000 gemessen wurden. Die Niederschlagsdaten reichen meist bis Ende 2017, da die neueren Daten vom DWD noch nicht auf ihre Plausibilität überprüft wurden. Jedoch besitzen viele Stationen auch kürzere Zeitreihen, da die Stationen verlegt oder die Messungen vollständig eingestellt wurden. Die Anzahl der verfügbaren Messzeitreihen je Einzugsgebiet schwankt zwischen einer und vier Stationen.

Die Schneedaten stammen wie die Niederschlagsdaten ebenfalls vom DWD und wurden nach den gleichen Kriterien ausgewählt. Die Daten besitzen eine tägliche Auflösung. Einzelne Stationen besitzen sehr lange Messzeitreihen, welche von 1937 bis zum heutigen Zeitpunkt vorhanden sind. Der Großteil der Stationen des DWD besitzt jedoch nur Messdaten, welche für einzelne oder wenige Jahre vorhanden sind. Dies liegt daran, dass viele Messreihen erst in den 2000er Jahren beginnen oder die Stationen den Messbetrieb eingestellt haben. Für zwei der verbliebenen Untersuchungsgebiete standen keine Schneedaten zur Verfügung. Diese Gebiete wurden jedoch nicht aus der Analyse ausgeschlossen. Auch für die Schneedaten stehen in den einzelnen Einzugsgebieten eine bis vier Messstationen zur Verfügung.

Weitere Datensätze für die nachfolgende Analyse und für die Vergleiche der Ergebnisse finden sich im WaBoA. Dazu zählen die mittleren zu erwartenden Niederschlagshöhen oder die abgeleiteten Abflusskomponenten aus der Modellierung mit RoGeR. Ebenfalls können grobe Werte für den Basisabflussindex (BFI) oder die Grundwasserneubildung genutzt werden, um die Ergebnisse dieser Analyse zu verifizieren. Auch eine Einteilung der Böden, der Geologie oder Landnutzung finden sich im WaBoA. Es gibt noch unzählige weitere Parameter, welche bei Bedarf für die nachfolgenden Analysen genutzt werden können. Alle Parameter liegen meist in einer Rasterauflösung von 5x5 m oder 25x25 m vor.

4.3.2 Datenaufbereitung

In dem ersten Schritt der Datenaufbereitung wurden alle Messdaten auf doppelte Datumsangaben oder Zeitlücken überprüft. Dabei wurden doppelte Datumsangaben entfernt und die Zeitlücken aufgefüllt, um eine vollständige Zeitreihe zu erhalten. Anschließend wurden die Daten auf negative oder unplausible Werte überprüft. Diese Werte wurden als nicht verfügbar definiert.

Die Niederschlags- und Schneedaten wurden des Weiteren über einen Korrekturfaktor auf die mittlere Gebietshöhe angepasst. Die mittlere Gebietshöhe wurde aus den Anteilen der einzelnen Höhenstufen der Einzugsgebiete berechnet. Dies wurde durchgeführt um die Niederschlags- und Schneedaten repräsentativer für das gesamte Einzugsgebiet zu machen, da einzelne Messstationen geringe Niederschläge in den Tälern oder sehr hohe Niederschlagsmengen auf den Bergen wiederspiegeln können.

Bei mehreren Messstationen wurde eine gemeinsame Datei der Stationsdaten erstellt, welche sich aus der Überlappung aller Daten zusammensetzt. Dabei wurde der längst mögliche Zeitraum ausgewählt, für welchen Messdaten einer Station vorhanden sind. Datenlücken oder fehlende Stationswerte wurden über die einzelnen Niederschlags- oder Schneegradienten zwischen den Stationen aufgefüllt. Die Gradienten wurden aus der Differenz der mittleren Niederschläge oder Schneehöhen berechnet und mit einer Distanzgewichtung verknüpft, welche näher gelegene Stationen stärker gewichtet. Dadurch konnten fehlende Messwerte einzelner Stationen im Verhältnis zu den gemessenen Niederschlägen oder Schneehöhen der anderen Stationen aufgefüllt werden. Aus allen vorhandenen Messdaten wurde ein mittlerer Gebietsniederschlag oder eine mittlere Schneehöhe für das Einzugsgebiet berechnet. Dabei wurden Stationen innerhalb des Einzugsgebietes stärker gewichtet als Stationen, die sich außerhalb des Untersuchungsgebietes befinden.

Aus den korrigierten Abflussdaten und den modifizierten Niederschlags- und Schneedaten wurde eine gemeinsame Datei erstellt. Dies kann dazu führen, dass die gemeinsame Zeitreihe deutlich kürzer ist als die Zeitreihen der einzelnen Parameter. Dieser Schritt war jedoch notwendig, da alle drei Parameter für die spätere Analyse benötigt werden. Die Länge der Zeitreihen, in der alle drei Parameter vorhanden sind, liegt dabei meist in einem Bereich von acht bis fünfzehn Jahren. Für die beiden Stationen ohne Schneehöheninformationen wurden die Wintermonate von November bis April aus der Analyse entfernt, damit keine schneebeeinflussten Ereignisse in die Analyse eingehen.

Die Daten aus dem Wasser und Bodenatlas Baden-Württemberg wurden von der gesamten Ausdehnung über Baden-Württemberg auf die zu untersuchenden Einzugsgebiete reduziert. Nachfolgend wurden die einzelnen Rasterpunkte zu gleichen Klassen zusammengefasst. Für die Landnutzung, die Höhenstufen, die Niederschlagsverteilung und einige weitere Parameter wurden zudem die prozentualen Anteile an der Gesamtfläche berechnet, wodurch Mittelwerte für das Gesamtgebiet abgleitet werden konnten. Dies gilt in gleicher Weise für die Abflusskomponententrennung aus der Modellierung mit RoGeR. Diese Parameter werden für die nachfolgenden Analysen oder die Evaluierung der Ergebnisse genutzt.

4.4 Ereignisseparation

Aus der gemeinsamen Datei der drei Einzugsgebietsparameter können Niederschlags-Abfluss Ereignisse separiert werden. Dies wurde auf zwei verschiedene Arten durchgeführt.

4.4.1 Niederschlagsseparation

Die erste Möglichkeit besteht in der Separation von Niederschlägen mit einer sehr hohen Jährlichkeit. Dabei wird ein gleitendes Mittel über die Niederschlagsdaten gelegt und die Stunden mit Niederschlägen markiert. Durch die Änderung zwischen Niederschlag oder kein Niederschlag kann der Beginn und das Ende eines Niederschlages definiert werden. Zusätzlich wird der maximale Niederschlag während des Ereignisses sowie der Massenschwerpunkt des Niederschlages bestimmt. Auch die gesamte Regenmenge, die Dauer und die Intensität des Ereignisses wird berechnet und abgeleitet. Da diese Selektion alle Niederschlagsereignisse beinhaltet, müssen alle nicht relevanten Ereignisse, die eine Niederschlagsmenge weniger als 15 bis 50 mm besitzen. Auch Ereignisse mit einer Intensität kleiner als 7,5 mm/h bis zu 25 mm/h wurden aus der Analyse entfernt. Der Schwellenwert hängt dabei vom Einzugsgebiet, der Zeitreihendauer der gemessenen Daten, dem mittleren Gebietsniederschlag und den erfassten Ereignissen ab. Außerdem werden schneebeeinflusste Ereignisse aus der Analyse entfernt, da diese nicht mit RoGeR modelliert werden können. Letztendlich sollen 15 bis 22 Ereignisse für die spätere Analyse übrigbleiben.

Für die verbleibenden Niederschlagsereignisse wird die Abflussspitze zwischen dem Beginn des Ereignisses und dem Beginn des nächsten Ereignisses ermittelt. Die Abflussspitze entspricht dabei dem maximalen Abfluss innerhalb einer Stunde. Zwischen der Abflussspitze und dem Beginn des Niederschlags wird der Beginn des ansteigenden Abflusses abgeleitet. Der minimale Abflusswert vor dem Anstieg des Hydrographen wird dabei als Beginn des Ereignisses verstanden. Das Abflussende wird als Zeitpunkt nach der Abflussspitze definiert, ab welchem der Gesamtabfluss wieder dem Basisabfluss entspricht. Dies kann dazu führen, dass einzelne Ereignisse eine sehr lange Dauer besitzen, da der Basisabfluss eines Gebietes nur sehr langsam reagiert oder weitere kleinere Ereignisse vor dem Ende des Ereignisses auftreten. Auch für den Abfluss wird der Masseschwerpunkt und die Dauer des Ereignisses berechnet. Außerdem wird der BFI, welcher sich aus dem Verhältnis des Basisabflusses zum Gesamtabfluss des Ereignisses ergibt, berechnet. Separierte Ereignisse, die große Datenlücken besitzen, werden ebenfalls aus der weiteren Analyse entfernt.

4.4.2 Abflussseparation

Die zweite Möglichkeit besteht in der Separation von Abflüssen mit einer sehr hohen Jährlichkeit. Dafür wird zunächst eine Dauerkurve aus allen vorhandenen Abflussdaten erstellt und die Überschreitungswahrscheinlichkeit berechnet. Diese ist beispielhaft für das Einzugsgebiet der Brugga in Abbildung 4.1 dargestellt. Der Schwellenwert für die Überschreitungswahrscheinlichkeit variiert meist zwischen einem Wert von 0,02% und 1%. Der einzelne Wert wird dabei je nach den gemessenen Daten und Ereignissen individuell für jedes Einzugsgebiet angepasst.

Die einzelnen Abflusswerte über dem Schwellenwert werden anschließend in Ereignisse aufgeteilt. Um als separates Ereignis zu gelten, müssen mindestens 24 Stunden zwischen den einzelnen Abflusswerten liegen. Für die separierten Ereignisse wird anschließend die Abflussspitze ermittelt. Der Beginn und das Ende der Niederschläge wird nach dem gleichen Prinzip wie für die Niederschlagsseparation durchgeführt. Anschließend wird der Niederschlag ausgewählt, der am nächsten zum Abflusspeak liegt.

Falls ein Ereignis aus mehreren Abflussspitzen besteht kann es vorkommen, dass der Niederschlagsbeginn von mehreren Ereignissen identisch ist. In diesem Fall wird der erste Niederschlag als Beginn definiert und die nachfolgenden Ereignisse aus der Analyse entfernt. Die restliche Analyse verläuft nach dem gleichen Prinzip wie bei der Niederschlagsseparation (vgl. Kapitel 4.4.1).



Abbildung 4.1: Dauerkurve für das Einzugsgebiet der Brugga.

Neben der eigentlichen Ereignisseparation mit den beiden beschriebenen Methoden wurden mehrere zeitliche Indizes verwendet, die dabei helfen sollen, die gemessenen Daten mit den modellierten Werten von RoGeR zu vergleichen. Die zeitlichen Indizes werden durch einen Vergleich des Hydrographen abgeleitet. Die Hydrographen spiegeln gewisse Gebietseigenschaften wider, welche zum Beispiel durch die Größe und Form des Einzugsgebietes, das Gefälle und die Dichte des Gewässernetzes oder die Landnutzung verursacht werden (Fang et al., 2005). Dies trägt dazu bei, die Ergebnisse der Abflusskomponententrennung besser interpretierbar zu gestalten, da der Oberflächenabfluss zum Beispiel schneller zum Hydrographen beiträgt als der Zwischenabfluss.

Ein Index ist die zeitliche Verzögerung des Abflusses in einem Einzugsgebiet. Diese ist definiert als die Zeit, welche zwischen dem Massenzentrum des Niederschlags und dem Massenzentrum des Abflusses vergeht. Das Massenzentrum beschreibt den Zeitpunkt, ab welchem 50% des Niederschlages gefallen bzw. 50% des Abflusses eines Ereignisses gemessen wurden (Fang et al., 2005). Ebenso kann die Zeit bis zur Abflusspitze ein wichtiges Kriterium darstellen. Diese wird oftmals als die Zeit zwischen dem Anstieg des Hydrographen und der Abflusspitze definiert. Eine weitere mögliche Definition wird durch die Zeit, die zwischen dem Massenzentrum des Niederschlages und der Abflusspitze vergeht, beschrieben (Fang et al., 2005). Auch die Zeit bis zum Basisabfluss kann als zeitlicher Index genutzt

werden. Dieser ist definiert als die Zeit, die von dem Beginn des Abflussereignisses bis zum vollständigen Anteil des Basisabflusses am Gesamtabfluss, vergeht (Fang et al., 2005).

4.5 BFI Kurven

4.5.1 Variation der Blockgröße

Um in den nachfolgenden Schritten eine Separation der Abflusskomponenten zu ermöglichen, wurde eine Analyse des Basisabflusses durchgeführt. Dabei wurde die Blocklänge (n), welche für die Bestimmung der Wendepunkte benötigt wird, für jedes Ereignis variiert. Die Blockgröße reicht dabei von einer Stunde bis zu der maximalen Dauer der einzelnen Ereignisse. Dies kann zu großen Variationen der Blocklänge zwischen den einzelnen Ereignissen führen. Für jede einzelne Blocklänge wurde die Summe des Basisabflusses und der BFI im Verhältnis zum Gesamtabfluss berechnet. Aus allen BFI Kurven wurde zusätzlich eine mittlere Kurve berechnet.

Die Verlaufskurven des BFI wurden nachfolgend für verschiedene Kriterien untersucht. Dazu zählt die Niederschlagsintensität, -menge und -dauer. Ereignisse, welche eine Intensität von weniger als 7,5 bis 10 mm/h besitzen, werden als ,schwache' Niederschläge definiert. Niederschläge, welche weniger als 24 Stunden andauern, werden als ,kurze' Ereignisse festgelegt. Fällt bei einem Niederschlagsereignis weniger als 50 bis 70 mm Regen wird dieses durch eine ,geringe' Niederschlagsmenge definiert.

Zusätzlich zu den Niederschlagskriterien werden auch die Vorfeuchtebedingungen für die weitere Analyse verwendet. Die Vorfeuchte wurde mit einem einfachen Absatz abgeleitet, da lediglich Niederschlagsdaten zur Verfügung standen. Die Vorfeuchte wurde als Niederschlagssumme der 21 Tage vor dem Abflussereignis definiert. Diese wurde in Verhältnis zu der mittleren zu erwartenden Niederschlagssumme, welche aus dem WaBoA entnommen wurde, für jedes Einzugsgebiet berechnet. Dabei spiegelt eine Abweichung zwischen -10 und 10 mm den Normalzustand wider. Kleinere Werte werden als ,trocken' und größere Werte als ,feucht' definiert.

4.5.2 Aufteilung in Szenarien

Anhand der zuvor beschriebenen Kriterien wurden die BFI Verlaufskurven in verschiedene Szenarien, welche an die Berechnungen des Modells RoGeR und dem WaBoA angelehnt sind, eingeteilt. Die einzelnen Werte können je nach Bedingungen in einem Einzugsgebiet schwach variieren. Für jedes Szenario wurde eine mittlere repräsentative BFI Kurve aus den einzelnen Ereignissen berechnet.

Das erste Szenario wird durch eine gesamte Niederschlagsmenge von weniger als 50 bis 70 mm, eine kurze Dauer von weniger als 24 Stunden und durch eher trockene Vorfeuchtebedingungen definiert. Das Szenario 1 von RoGeR wird dabei durch 40 mm Niederschlagshöhe, eine Niederschlagsdauer von einer Stunde und durch eine nutzbare Feldkapazität von 30% charakterisiert. Dies entspricht dem trockenen Kriterium und einem kurzen Starkniederschlag oder "Flash Flood" in der Analyse.

Das zweite Szenario besitzt die gleiche Niederschlagsdauer und -menge wie das Szenario 1, jedoch ist die Vorfeuchte durch eher nasse Anfangsbedingungen charakterisiert. In RoGeR wird das zweite Szenario durch 30 mm Niederschlagskapazität bei einer Dauer von einer Stunde und durch eine nutzbare Feldkapazität von 90% geprägt. Dies entspricht ebenfalls einem "Flash Flood' Ereignis, welches jedoch durch eine hohe Vorfeuchte beschrieben wird.

Die letzten beiden Szenarien weisen eine Niederschlagsmenge von mehr als 50 bis 70 mm und eine Dauer, die größer als 24 Stunden ist, auf. Im dritten Szenario ist die Vorfeuchte wieder durch trockene Anfangsbedingungen geprägt Das Szenario 3 bei der Modellierung mit RoGeR wird durch eine Niederschlagsmenge von 70 mm und durch eine Niederschlagsdauer von 24 Stunden beschrieben. Die nutzbare Feldkapazität liegt zudem bei 30%. Dies entspricht einem länger andauernden Starkniederschlag, welcher unter trockenen Vorfeuchtebedingungen stattfindet.

Beim vierten Szenario liegt die Vorfeuchte im oberen Bereich der nFK und symbolisiert feuchte Anfangsbedingungen vor einem Ereignis. Das letzte und vierte Szenario von RoGeR wird durch eine Niederschlagshöhe von 70 mm, eine Dauer von 24 Stunden und durch eine nutzbare Feldkapazität von 90% charakterisiert. Dies entspricht ebenfalls einem längeren Starkniederschlag, der unter feuchten Anfangsbedingungen auftritt.

4.6 Einheitsganglinien

Um die Abflusskomponenten aus den BFI Kurven separieren zu können, wurden die Einheitsganglinien des Oberflächenabflusses (HOF und SOF) und des Zwischenabflusses für jedes Einzugsgebiet berechnet. Diese beschreiben den Anteil der beiden Abflusskomponenten für jeden Zeitschritt während eines hypothetischen Niederschlagsereignisses. Die Länge der Zeitschritte wurde dabei auf eine Stunde festgelegt, um mit den Zeitschritten der Messdaten überein zu stimmen.

Als Eingangsdaten werden die Einzugsgebietsgrenzen und ein digitales Geländemodell benötigt. Diese liegen als Rasterdatensatz in einer Auflösung von 25x25 m vor. Auch die Landnutzung, der Versiegelungsgrad, das Gefälle (s) und die Bodenmächtigkeit werden für die weitere Analyse verwendet. Diese besitzen ein Raster von 5x5 Metern. Außerdem muss das Rasterfeld, welches den Gebietsauslass beinhaltet, manuell definiert oder über seine Koordinaten berechnet werden.

Der Oberflächenabfluss wird durch den Ansatz von Manninger – Strickler berechnet. Dabei werden den einzelnen Landnutzungsklassen Strickler – Werte (k), die die Rauigkeit der unterschiedlichen Oberflächen beschreiben, zugeordnet. Für die verstädterten Bereiche wird die Rauigkeit anhand des Versiegelungsgrades modifiziert. Die Geschwindigkeit (V) wird anschließend durch die Formel berechnet.

$$V = k \times (s \times 0.01)^{0.5} \times 60$$
 (2.)

Für den Zwischenabfluss wird die Fließgeschwindigkeit des Niederschlags aus einer empirischen Tabelle abgeleitet. Diese beruht auf idealtypischen Gefälle-Fließgeschwindigkeit Kurven, welche aus diversen Feldstudien und Messungen abgeleitet wurden und in Abbildung 4.2 dargestellt sind. Die Geschwindigkeit hängt dabei von der Bodenmächtigkeit und dem Gefälle ab. Je geringer die Bodenmächtigkeit und je größer das Gefälle, desto höher die Geschwindigkeit des Zwischenabflusses. Jedoch muss die Geschwindigkeitsverteilung des Zwischenabflusses nachfolgend modifiziert werden, da auf Flüssen, Feuchtflächen oder versiegelten Bereichen kein Zwischenabfluss entstehen kann. Für diese Gebiete werden die Geschwindigkeiten aus der Berechnung des Oberflächenabflusses verwendet. Die Geschwindigkeit ist für beide Abflusskomponenten auf einen maximalen Wert von 3 m/s begrenzt, welcher meist nur in den Flüssen erreicht wird.



Abbildung 4.2: Gefälle-Fließgeschwindigkeit Kurven für verschiedene Bodenmächtigkeiten, welche für die Berechnung des Zwischenabflusses benötigt werden (Steinbrich et al., 2015).

Für die Berechnung der Abflussanteile wird die Fließrichtung über das digitale Geländemodell abgeleitet und mit der Geschwindigkeit der entsprechenden Rasterzelle verrechnet. Das Modell berechnet für jeden Zeitschritt den Abfluss und die Anzahl der Rasterzellen, die am Gebietsauslass ankommen. Über die Gesamtanzahl der Rasterzellen und die Anzahl der Rasterzellen zu jedem Zeitschritt kann der Abflussanteil bestimmt werden.

4.7 Vergleich der berechneten Abflusskomponenten mit RoGeR

Durch die Kombination der BFI Kurven mit den Einheitsganglinien- des Oberflächen- und Zwischenabflusses konnten die einzelnen Abflusskomponenten bestimmt werden. Dazu werden aus den beiden Einheitsganglinien die Anteile des Abflusses für jeden Zeitschritt berechnet, indem die Häufigkeiten der beiden Einheitsganglinien aufsummiert und die einzelnen Anteile durch die Summe geteilt werden. Der BFI Wert für jeden Zeitschritt entspricht dem Anteil an Basisabfluss. Aus der Differenz zum Gesamtabfluss ergibt sich der Abflussanteil, welcher aus Oberflächen- und Zwischenabfluss besteht. Über die Anteile aus den Einheitsganglinien wird der fehlende Abflussanteil in die beiden Klassen eingeteilt. Dies wird sowohl für den Mittelwert aus allen BFI Kurven als auch für die vier unterschiedlichen Szenarien durchgeführt.

Die berechneten Abflusskomponenten werden anschließend mit den modellierten Ergebnissen aus RoGeR verglichen. Dabei wird sowohl die absolute als auch die prozentuale Abweichung zwischen den drei Abflusskomponenten und den Ergebnissen aus RoGeR berechnet. Dies wurde für den Mittelwert aus allen vier RoGeR Szenarien, sowie separat für die einzelnen Ereignisse durchgeführt, um die Unterschiede basierend auf den verschiedenen Anfangsbedingungen genauer analysieren zu können.

4.8 Zusammenführung der Untersuchungsgebiete

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den anderen Untersuchungsgebieten zu erhalten, wurden die Ergebnisse aus den Modellierungen der einzelnen Gebiete in einem letzten Schritt zusammengeführt. Dies ermöglicht eine Überprüfung, für welche Teilgebiete die beschriebene Methodik die besten oder schlechtesten Ergebnisse liefert. Die Zusammenführung wurde nach der gleichen Methodik, welche in Kapitel 4.7 beschrieben wurde, durchgeführt.

Zu beachten ist hierbei, dass das Szenario mit 40 mm Niederschlag, einer Dauer von einer Stunde und einer nutzbaren Feldkapazität von 30% nicht für das Gebiet der Stunzach zur Verfügung steht. Dies ist durch die relativ hohe Vorfeuchte bei den einzelnen Ereignissen bedingt, welche eine Separierung für dieses Szenario nicht zuließen. Auch das Szenario mit 30 mm Niederschlagshöhe, einer Dauer von einer Stunde und einer hohen Vorfeuchte von 90% konnte nicht für alle Gebiete abgetrennt werden. Für das Untersuchungsgebiet Kirchheim konnten aufgrund der niedrigen Vorfeuchtebedingungen im Sommer keine Ereignisse mit einer solch hohen Vorfeuchte separiert werden. Die meisten fehlenden Untersuchungsgebiete weist das Szenario mit 70 mm Niederschlag, einer Dauer von 24 Stunden und einer niedrigen Vorfeuchte von 30% auf. Für dieses Szenario muss auf die Gebiete Möhringen und

Ummendorf verzichtet werden. Die Ereignisse in diesen Gebieten wiesen meist eine hohe Vorfeuchte auf, die eine Separation unmöglich machte. Für das vierte Szenario mit 70 mm Niederschlag, einer Dauer von 24 h und einer nutzbaren Feldkapazität von 90% liegen für ein Einzugsgebiet keine Ereignisse vor. Dies trifft ebenfalls auf das Gebiet der Lindach zu, welches keine hohen Vorfeuchteereignisse aufweisen kann.

Die Ergebnisse wurden außerdem räumlich mit dem Programm "ArcGIS" dargestellt. Dafür wurden die prozentualen Abweichungen zwischen den berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven der einzelnen Szenarien und den Modellierungsergebnissen von RoGeR in vier Kategorien eingeteilt. Die Kategorie 1 repräsentiert dabei eine Abweichung von \pm 10% zwischen den beiden Ergebnissen. Die Klasse 2 steht für eine Abweichung von 10 - 25% in positiver und negativer Richtung. Kategorie 3 stellt eine Abweichung zwischen 25 – 50% in beide Richtungen dar und Klasse 4 spiegelt die Abweichung wider, die größer als 50% bzw. kleiner als -50% ist.

Die beschriebenen Methoden wurden für alle Einzugsgebiete angewendet, jedoch werden die Ergebnisse nur anhand der Untersuchungsgebiete des Friesenheimer Dorfbachs und der Brugga beschrieben. Dies liegt daran, dass die Ergebnisse der einzelnen Einzugsgebiete sich in ihrer Struktur und dem Aufbau ähneln und vergleichbare Schlussfolgerungen gezogen werden können. Des Weiteren soll das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf der Abflusskomponententrennung, dem Vergleich mit RoGeR und der Zusammenführung der einzelnen Einzugsgebiete liegen.

5.1 Datenaufbereitung

Für die verbliebenen Untersuchungsgebiete lagen Messdaten von einer bis vier Stationen des DWD für den Niederschlag oder die Schneehöhe vor. In Abbildung 5.1 ist das beispielhafte Vorgehen für den Friesenheimer Dorfbach dargestellt, für welchen zwei Messstationen vorhanden sind.



Abbildung 5.1: Rohdaten des Niederschlages für die Messstationen Nr. 1602 (oben) und 2812 (unten) des DWD für das Untersuchungsgebiet des Friesenheimer Dorfbachs.

Die erste Messstation (1602) befindet sich in Gegenbach auf einer Höhe von 186 Metern. Die Station liegt ungefähr 6,5 Kilometern nordöstlich des Untersuchungsgebiet. Sie besitzt Niederschlagsdaten, welche von Anfang 2004 bis Ende 2017 reichen. Die Zeitreihe besitzt keine negativen Niederschläge, welche auf Datenlücken oder fehlende Messwerte hinweisen würden. Der maximale gemessene Niederschlag in einer Stunde liegt bei fast 50 mm.

Die zweite Messstation (2812) liegt im Stadtgebiet von Lahr. Die Station befindet sich 155 Meter über Normalnull und ist etwa drei Kilometern westlich des Untersuchungsgebietes gelegen. Die Messdaten beginnen im Jahr 1996 und reichen ebenfalls bis Ende 2017. Es wird direkt ersichtlich, dass es mehrere Datenlücken in der Zeitreihe gibt, welche durch negative Niederschläge charakterisiert sind. Der maximale Niederschlag wurde mit 39 mm pro Stunde gemessen.

In Abbildung 5.2 sind die modifizierten und gemittelten Niederschlagsdaten der beiden Messstationen des Friesenheimer Dorfbachs dargestellt. Dabei fällt auf, dass das der Beginn der Zeitreihe mit dem Beginn der Messdaten von Station 2812 übereinstimmt, obwohl keine Messdaten für die Station 1602 vorliegen. Die fehlenden Daten der Station 1602 wurden über einen Höhengradienten des Niederschlages und ein Entfernungsmaß berechnet und anschließend mit den Daten der Station 2812 gemittelt. Des Weiteren wird ersichtlich, dass die kombinierten Zeitreihen keine negativen Messwerte besitzen. Diese Lücken wurden nach dem gleichen Verfahren wie zuvor beschrieben aus den Daten der anderen Station aufgefüllt. Auffällig ist, dass die höchsten Niederschläge, welche eine Intensität von mehr als 50 mm pro Stunde erreichen können, meist in den Sommermonaten auftreten. Dies deutet auf konvektive Starkniederschläge hin.



Abbildung 5.2: Modifizierte und gemittelte Niederschlagsdaten aus den beiden Messstationen des DWD für den Friesenheimer Dorfbach.

Eine Besonderheit der Schneedaten besteht darin, dass die Messungen an vielen Stationen lediglich in den Wintermonaten durchgeführt wurden. Dies führt zu regelmäßigen Datenlücken in den Sommermonaten, welche durch eine Schneehöhe von 0 cm ersetzt wurde. Außerdem besitzen die Schneedaten in täglicher Auflösung meist eine längere Zeitreihe als die hochaufgelösten Niederschlagsdaten, wodurch die Niederschlagsdaten den limitierenden Faktor der Zeitreihe darstellen.

5.2 Ereignisseparation

Die nachfolgenden zwei Ereignisse wurden durch die Niederschlagsseparationsmethode abgetrennt. Die Ereignisse sind durch hohe Niederschlagsintensitäten und kurze Dauern gekennzeichnet. Die Ereignisse treten hauptsächlich in den Sommermonaten des Jahres auf.

In Abbildung 5.3 ist die Separation eines kurzen Niederschlagsereignisses dargestellt. Der auslösende Niederschlag des Ereignisses dauert mehr als 24 Stunden mit einem maximalen Niederschlag von knapp 25 mm pro Stunde in der Mitte der Niederschlagsdauer. Der Abfluss liegt zu Beginn des Ereignisses bei etwas mehr als einem Kubikmeter pro Sekunde. Der maximale Abfluss von 15,6 m³/h wird 19 Stunden nach Beginn des Ereignisses und fünf Stunden nach dem maximalen Niederschlag erreicht. Die Rezession dauert fast drei Wochen an. Dies liegt auch daran, dass mehrere kleine Niederschlagsereignisse die Rezession unterbrechen.



Abbildung 5.3: Ereignis eines kurzen Niederschlages im Einzugsgebiet der Brugga, welches mit der Niederschlagsseparationsmethode abgetrennt wurde.

In Abbildung 5.4 ist ein Starkniederschlag oder "Flash Flood" Ereignis dargestellt. Das Ereignis zeichnet sich durch eine sehr kurze Niederschlagsdauer von drei Stunden aus. Der maximale Niederschlag liegt bei fast 50 mm/h. Dies führt zu einer sofortigen Reaktion des Einzugsgebietes, wodurch der Abfluss

von weniger als einem auf mehr als 16 Kubikmeter pro Sekunde ansteigt. Die Rezession des Ereignisses dauert ebenfalls nur wenige Tage. Diese wäre noch kürzer ausgefallen, jedoch wurde diese durch ein kleines Niederschlagsereignis etwa einen Tag nach dem maximalen Abfluss unterbrochen.



Abbildung 5.4: Ereignis eines Starkniederschlages im Einzugsgebiet der Brugga, welches mit der Niederschlagsseparationsmethode abgetrennt wurde.

Die nachfolgenden drei Ereignisse wurden über die Abflussseparationsmethode abgetrennt und zeichnen sich durch eine lange Niederschlagsdauer aus. Alle Ereignisse befinden sich in den späten Herbst-, den Winter- oder ersten Frühjahresmonaten.



Abbildung 5.5: Ereignis eines mittleren Niederschlages im Einzugsgebiet der Brugga, welches mit der Abflussseparationsmethode abgetrennt wurde.

Das erste Ereignis in Abbildung 5.5 besitzt die kürzeste Niederschlagsdauer der drei Ereignisse. Diese dauert rund drei Tage mit einem Maximum von 15 mm/h nach einem Tag Niederschlagsdauer. Die restlichen Niederschlagshöhen liegen meist zwischen 1-2 mm/h. Der Abfluss steigt zuerst langsam an und reagiert dann sehr schnell auf das Niederschlagsmaximum. Zu Beginn des Ereignisses lag der Abfluss bei rund 1,5 m³/s und das nachfolgende Maximum erreicht rund 14 m³/s. Die Rezession dauert ungefähr drei Wochen an, da diese durch zwei weitere Niederschläge unterbrochen wurde.

Das zweite Ereignis der Abflussseparation ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Deutlich ersichtlich sind die fünf größeren Abflussspitzen des Ereignisses, welche durch fünf separate Niederschlagsereignisse ausgelöst wurden. Die ersten beiden und der letzte Peak werden durch länger andauernde, aber schwache Niederschläge von weniger als 5 mm/h ausgelöst. Der dritte und vierte Peak werden durch stärkere Niederschläge von mehr als 10 mm/h ausgelöst. Der dritte Peak besitzt den größten Abflusswert von etwa 18,5 m³/s. Auffällig ist, dass der maximale Abfluss durch einen sehr kurzen Niederschlag ausgelöst wird. Die Niederschlagsmenge des vierten Peaks ist deutlich höher, jedoch fällt die Reaktion des Abflusses deutlich geringer aus. Interessant ist auch, dass trotz mittlerer Niederschlagsmengen zwischen dem dritten und vierten Peak eine größere Reaktion des Einzugsgebietes ausbleibt. Die Rezession nach dem maximalen Abfluss verläuft verhältnismäßig schnell und ist trotz mehren Niederschlagsunterbrechungen nach etwa 12 Tagen beendet.



Abbildung 5.6: Ereignis mit mehreren mittleren Niederschlägen und Abflussspitzen im Einzugsgebiet der Brugga, welches mit der Abflussseparationsmethode abgetrennt wurde.

Das letzte Ereignis der Abflussseparation zeichnet sich wie das vorherige durch fünf unterschiedliche Abflussspitzen aus und ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Der zweite Peak stellt dabei das Abflussmaximum dar. Der dritte und vierte Peak besitzen ebenso eine Niederschlagshöhe von 4 mm/h, jedoch fällt die Gebietsreaktion deutlich geringer aus. Die Abflussreaktion nach dem ersten

Niederschlag ist noch etwas verzögert. Die nachfolgenden Niederschläge führen aber fast umgehend zu einer Reaktion des Abflusses. Insgesamt zeichnet sich dieses Ereignis durch einen hohen Abfluss von 15 m³/s aus, welcher jedoch durch sehr geringe Niederschlagssummen von maximal 4 mm/h ausgelöst werden. Die Rezession des Ereignisses dauert relativ lange und liegt bei ungefähr drei Wochen. Die letzten zwei Niederschläge des Ereignisses führen zu keiner Reaktion des Gebietes, welche die Rezession verlangsamen würde.



Abbildung 5.7: Ereignis mit mehreren sehr schwachen Niederschlägen und Abflussspitzen im Einzugsgebiet der Brugga, welches mit der Abflussseparationsmethode abgetrennt wurde.

5.3 BFI Kurven

In Abbildung 5.8 sind die BFI Kurven aus allen Ereignissen der beiden Separationsmethoden dargestellt. Dabei fällt auf, dass alle BFI Kurven exponentiell absinken. Jedoch unterscheidet sich die Form und der Verlauf der einzelnen Kurven deutlich voneinander. Einzelne Ereignisse sind bereits nach 100 Stunden beendet, während das längste Ereignis fast 700 Stunden andauert. Es fällt auf, dass sich alle Ereignisse mit zunehmender Blockgröße einem individuellen Grenzwert anzunähern scheinen. Diese Grenzwerte weichen dabei stark voneinander ab. Der höchste Grenzwert liegt bei einem BFI von ungefähr 0,65, während die niedrigsten Grenzwerte einem Basisabflussanteil von 0,15 entsprechen. Daraus folgt, dass die BFI Kurven aufgrund ihre lokalen Gebietseigenschaften unterschiedlich schnell und stark absinken.

Um diesen Effekt genauer analysieren zu können, wurden die BFI Kurven in Abbildung 5.9 mit einer logarithmischen x-Achse dargestellt, wodurch besonders die niedrigen Blockgrößen und Unterschiede der einzelnen Kurven untersucht werden können. Dabei fällt auf, dass alle BFI Kurven bei einem Wert von 1 starten, jedoch einige Ereignisse bereits bei einer Blocklänge kleiner als zehn Stunden stark absinken. Beispielhaft hierfür können die beiden dunkelblauen Kurven angeführt werden, welche bei einer Blockgröße von sechs Stunden von einem BFI Wert von über 0,9 auf unter 0,7 abgesunken sind.

Die meisten Ereignisse besitzen den größten Abfall des BFI zwischen 10 und 100 Stunden der Blockgröße. Das Absinken des BFI kann dabei sehr langsam und kontinuierlich erfolgen. Diese Ereignisse weisen meist den höchsten Anteil an Basisabfluss auf, sobald die maximal mögliche Blockgröße erreicht wurde. Die Ereignisse, welche den niedrigsten BFI besitzen, zeichnen sich durch einen starken und abrupten Abfall der Kurve aus. Dies verdeutlichen vor allem die violetten Ereignisse, welche sich durch einen abrupten Abfall von 0,7 auf unter 0,4 innerhalb weniger Stunden auszeichnen.



Abbildung 5.8: BFI Kurven für alle separierten Ereignisses des Brugga Einzugsgebietes.



Abbildung 5.9: BFI Kurven für alle separierten Ereignisses des Brugga Einzugsgebietes. Die x-Achse ist für eine bessere Übersicht logarithmisch normiert.

Abbildung 5.10 gibt die BFI Kurven der einzelnen Ereignisse in logarithmischer Darstellung wieder, jedoch wurden die Kurven nach ihrer Niederschlagsintensität und -dauer charakterisiert und in vier Klassen eingeteilt. Dabei fällt auf, dass die schwachen Regenfälle für kleine und mittlere Blocklängen bis 50 Stunden meist den höchsten BFI besitzen, jedoch sinkt dieser zur maximalen Blockgröße immer weiter ab und liegt meist unter den starken Niederschlägen. Für die stärkeren Niederschlagsereignisse ist der Verlauf umgekehrt. Diese fallen zu Beginn sehr schnell und stark ab, jedoch liegen die BFI Kurven bei der maximalen Blocklänge meistens über den schwachen Niederschlagsereignissen. Die Dauer des Niederschlages spielt für den Verlauf der Kurven keine große Rolle. Der BFI der langen Ereignisse liegt meist nur etwas geringer als bei den kurzen Niederschlägen. Die maximale Blocklänge der langen Niederschläge ist oftmals größer als bei den kurzen Ereignissen.

Die logarithmischen BFI Kurven, welche nach der Bodenfeuchte in drei Klassen eingeteilt wurden, werden in Abbildung 5.11 wiedergegeben. Dabei fällt auf, dass trockene Abflussereignisse meist einen höheren BFI besitzen als feuchte Ereignisse. Jedoch gibt es auch 2-3 BFI Kurven, welche unter einer geringen Bodenfeuchte aufgetreten sind und dennoch einen geringen Basisabflussanteil aufweisen. Diese Ereignisse zeichnen sich durch einen schnellen Abfall bei einer kleinen Blocklänge aus. Dies gilt in umgekehrter Weise auch für 3-4 feuchte Abflussereignisse, welche einen verhältnismäßig hohen BFI besitzen. Diesen Ereignissen fehlt der starke Abfall des BFI zwischen einer Blocklänge von 10 bis 100 Stunden, welcher zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr ausgeglichen wird.



Blocklänge [h]

Abbildung 5.10: BFI Kurven für alle separierten Ereignisses des Brugga Einzugsgebietes. Die Ereignisse wurden nach der Niederschlagsintensität und -dauer in vier Klassen eingeteilt. Die x-Achse ist für eine bessere Übersicht logarithmisch normiert.





Abbildung 5.11: BFI Kurven für alle separierten Ereignisses des Brugga Einzugsgebietes. Die Ereignisse wurden nach den Vorfeuchtebedingungen in drei Klassen eingeteilt. Die x-Achse ist für eine bessere Übersicht logarithmisch normiert.

5.4 Einheitsganglinien

Abbildung 5.12 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung für die Berechnung der Einheitsganglinie des Horton'schen Oberflächenabflusses im Einzugsgebiet der Brugga. Dabei fällt vor allem auf, dass die Flüsse mit Abstand die höchste Fließgeschwindigkeit besitzen. Die Hangbereiche weisen ebenfalls eine relativ hohe Geschwindigkeit auf und tragen dazu bei, den Niederschlag mit geringer zeitlicher Verzögerung zu den Vorflutern zu leiten. Auf den flachen Hochebenen des Schauinsland im Westen oder dem Feldberg im Südosten, sowie in den Tälern treten die geringsten Fließgeschwindigkeiten auf. Auffällig dabei sind die punktuell erhöhten Geschwindigkeiten in den Gebieten, welche auf verstädterte Bereiche mit höheren Fließgeschwindigkeiten zurückzuführen sind.

Die Geschwindigkeitsverteilung des Zwischenabflusses für das Brugga Einzugsgebiet ist in Abbildung 5.13 wiedergegeben. Die Geschwindigkeiten des Zwischenabflusses auf den meisten Flächen des Untersuchungsgebietes liegen deutlich unter denen des Horton'schen Oberflächenabflusses. Die Geschwindigkeit auf den versiegelten Flächen, Flüssen und Feuchtflächen ist genauso groß wie für den Horton'schen Oberflächenabfluss, da kein Zwischenabfluss auf diesen Flächen gebildet werden kann. Diese Flächen tragen dadurch am schnellsten zur Abflussreaktion des Gebietes bei. Nachfolgenden sind die steilen Hänge des Einzugsgebietes zu nennen, welche sehr hohe Geschwindigkeiten für den Zwischenabfluss ermöglichen. Die flächeren Bereiche des Schauinslands, des Feldbergs und die Talbereichen besitzen die geringsten Geschwindigkeiten aller Teilbereiche des Untersuchungsgebietes.



Abbildung 5.12: Geschwindigkeitsverteilung des Horton'schen Oberflächenabflusses für das Einzugsgebiet der Brugga. Die x- und y-Achse entsprechen der Anzahl der vorhandenen Rasterzellen mit einer Auflösung von 5x5 Meter.



Abbildung 5.13: Geschwindigkeitsverteilung des Zwischenabflusses für das Einzugsgebiet der Brugga. Die x- und y-Achse entsprechen der Anzahl der vorhandenen Rasterzellen mit einer Auflösung von 5x5 Meter.

Die aus den Geschwindigkeitsverteilungen des Oberflächen- und Zwischenabflusses abgeleiteten Einheitsganglinien sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Dabei fällt auf, dass die Einheitsganglinie des Horton'schen Oberflächenabflusses bereits nach wenigen Stunden sehr schnell ansteigt. Der Anstieg verläuft deutlich steiler als bei der Einheitsganglinie des Zwischenabflusses. Der Zwischenabfluss steigt erst fünf Stunden nach dem Niederschlag an und erhöht sich langsam über mehr als 25 Stunden. Der maximale Wert wird nach ungefähr 35 Stunden erreicht, wohingegen dies für den Oberflächenabfluss

bereits nach der Hälfte der Zeit der Fall ist. Die maximale Häufigkeit liegt mit einem Wert von fast 6% für den Horton'schen Oberflächenabfluss mehr als doppelt so hoch wie für den Zwischenabfluss.



Abbildung 5.14: Einheitsganglinien des Horton'schen Oberflächen- und Zwischenabflusses für das Einzugsgebiet der Brugga.

5.5 Abflusskomponententrennung

Die Abflusskomponententrennung in diesem Kapitel und die Gebietszusammenführung in Kapitel 5.6 werden aus platztechnischen Gründen lediglich für die Mittelung aus allen BFI Kurven und den vier RoGeR Szenarien, sowie für die separaten Szenarien 3 und 4 beschrieben. Das Szenario 1, welches durch eine geringe Vorfeuchte charakterisiert ist, verhält sich ähnlich dem Szenario 3. Dies gilt in gleicher Weise für die Szenarien 2 und 4, welche durch feuchte Anfangsbedingungen geprägt sind. Die graphischen Abbildungen sind im Anhang II und III angefügt. Auf die genauen Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien wird in der Diskussion ausführlich eingegangen.

5.5.1 Mittelung aus den Szenarien

Die Ergebnisse der Abflusskomponententrennung für alle BFI Kurven in Kombination mit den Einheitsganglinien ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Der Basisabfluss beginnt bei einer Blocklänge von 0 Stunden und einem Anteil von 100% und sinkt mit zunehmender Blocklänge exponentiell ab. Das Minimum des Basisabflusses wird bei der maximalen Blocklänge von fast 240 Stunden erreicht und liegt bei knapp unter 40%. Bei geringen Blocklängen von bis zu 25 Stunden liegt der Horton'sche Oberflächenabfluss über dem Anteil an Zwischenabfluss. Er erreicht dabei einen maximalen Anteil am Gesamtabfluss von knapp 30%. Zwischen einer Blocklänge von 25 und 75 Stunden fällt der Oberflächenabfluss rapide bis auf einen Anteil von 0% ab. Stattdessen erhöht sich der Zwischenabfluss

und übersteigt den Anteil des Basisabflusses bei einer Blocklänge von ungefähr 75 Stunden. Das Maximum des Zwischenabfluss erreicht einen Anteil von knapp 70% des Gesamtabflusses. Sowohl der Basisabfluss als auch der Zwischenabfluss scheinen auf einen konstanten Grenzwert zuzulaufen, welcher jedoch bis zu der maximalen Blocklänge von 240 Stunden noch nicht erreicht zu sein scheint.



Abbildung 5.15: Abflusskomponenten des Oberflächen-, Zwischen- und Basisabflusses für das Einzugsgebiet der Brugga. Der Basisabfluss wurde als Mittelwert der BFI Kurven für alle Niederschlags-Abfluss Ereignisse abgeleitet.

Nach der Aufteilung der Abflusskomponenten wurden diese Ergebnisse mit der Modellierung von RoGeR verglichen. Der Vergleich der Abflusskomponenten, welcher für die mittlere BFI Kurve aus allen Ereignissen abgeleitet wurde, ist in Abbildung 5.16 dargestellt. Die Entfernung zur 1:1 Linie entspricht der absoluten Abweichung. Der Oberflächenabfluss weist die geringste absolute Abweichung gegenüber der Modellierung mit RoGeR auf. Der Anteil der Abflusskomponententrennung liegt bei durchschnittlich 5%. Wie in Abbildung 5.17 ersichtlich wird, liegt die prozentuale Abweichung jedoch fast 100% unter dem modellierten Anteil von RoGeR. Dies entspricht der größten prozentualen Abweichung aller drei Abflusskomponenten. Mit der mittleren BFI Kurve wurde ein Zwischenabflussanteil von knapp 50% ermittelt. RoGeR modelliert hingegen einen Anteil von etwas mehr als 25%. Dies entspricht einer absoluten Abweichung von fast 25% und einer prozentualen Abweichung, welche in der gleichen Größenordnung wie der Oberflächenabfluss liegt. Der mittlere Basisabfluss wurde mit einem Wert von etwa 45% berechnet. Bei der Modellierung mit RoGeR wurde ein Anteil von ungefähr 65% geschätzt. Dies entspricht der geringsten prozentualen Abweichung von etwa 45%. Zu beachten ist, dass der Oberflächen- und Basisabfluss mit der BFI Methode unterschätzt und der Zwischenabfluss überschätzt werden.



Abbildung 5.16: Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven für alle Events mit den gemittelten RoGeR Abflusskomponenten aus allen vier Szenarien für das Brugga Einzugsgebiet.



Abbildung 5.17: Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven für alle Events mit den gemittelten RoGeR Abflusskomponenten aus allen vier Szenarien für das Brugga Einzugsgebiet. Die Abweichung ist logarithmisch normiert.

5.5.2 Szenario 3

Die Aufteilung der Abflusskomponenten für das Szenario mit 70 mm Niederschlag, einer Dauer von 24 Stunden und einer Vorfeuchte von 30% wird in Abbildung 5.18 wiedergegeben. Der Basisabfluss sinkt für die geringen Blocklängen von bis zu 40 Stunden sehr schnell auf etwa 55% ab. Danach pendelt sich

der Basisabfluss ohne größere Sprünge auf einem Niveau von 45% ein. Der Oberflächenabfluss steigt in diesem Szenario schnell an und pendelt sich bei einem Anteil von knapp 30% ein. Erst durch den starken Anstieg des Zwischenabflusses nach 25 Stunden Blocklänge sinkt der Oberflächenabfluss auf einen Wert von Null ab. Der Zwischenabfluss steigt besonders zwischen der Blocklänge von 25 und 45 Stunden sehr stark an und erreicht einen Abflussanteil von etwa 45%. Nach einer Blocklänge von 120 Stunden überschreitet der Zwischenabfluss den Anteil an Basisabfluss. Bei der maximalen Blocklänge von fast 240 Stunden erreicht der Zwischenabfluss einen Anteil am Gesamtabfluss von knapp 55%.



Abbildung 5.18: Abflusskomponenten des Oberflächen-, Zwischen- und Basisabflusses für das Einzugsgebiet der Brugga. Der Basisabfluss wurde als Mittelwert der BFI Kurven für das Szenario 3 abgeleitet.

Die absolute Abweichung zwischen der Abflusskomponententrennung für das Szenario mit 70 mm Niederschlag, einer Dauer von 24 Stunden und einer nutzbaren Feldkapazität von 30% ist in Abbildung 5.19 dargestellt. Die prozentuale Abweichung der Abflusskomponenten von den Ergebnissen von RoGeR wird in Abbildung 5.20 wiedergegeben. Der Basisabfluss besitzt sowohl die geringste absolute als auch prozentuale Abweichung zu der Modellierung aus RoGeR. Die prozentuale Differenz liegt bei weniger als 10%. Der Basisabfluss wird von beiden Methoden auf einen Anteil von knapp 40% geschätzt. Der Zwischenabfluss besitzt die größte absolute Abweichung zu den Ergebnissen von RoGeR liegt dieser Anteil bei ungefähr 55%. Die prozentuale Abweichung liegt geringfügig über 10% und damit relativ nahe an den Modellierungsergebnissen von RoGeR. Der Oberflächenabfluss besitzt eine etwas geringere absolute Abweichung als der Zwischenabfluss. Der Anteil aus der Abflusskomponententrennung liegt zwischen 4 und 5%. Die Modellierung mit RoGeR kommt zu einem Anteil von etwa 8 bis 9%. Dies führt zu einer prozentuale Abweichung von fast 100%. Auch in diesem

Fall wird der Oberflächen- und Basisabfluss mit der BFI Methodik unterschätzt. Der Zwischenabfluss wird hingegen überschätzt.



Abflussanteil BFI-Methode [%]

Abbildung 5.19: Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 3 und das Einzugsgebiet der Brugga.



Abbildung 5.20: Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 3 und das Einzugsgebiet der Brugga. Die Abweichung ist logarithmisch dargestellt.

5.5.3 Szenario 4

Die mittlere BFI Kurve für das Szenario mit 70 mm Niederschlag, einer Dauer von 24 Stunden und einer Vorfeuchte von 90% wurde genutzt, um die Abflusskomponenten des Brugga Einzugsgebietes

aufzuteilen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.21 dargestellt. Der Basisabfluss sinkt bei den geringen Blocklängen, welche unter zehn Stunden liegen, etwas langsamer ab als für das Szenario 3 mit seiner geringen Bodenfeuchte. Der Abfall der Kurve hält dafür bis zu einer Blocklänge von 50 Stunden kontinuierlich an, wodurch der Basisabfluss auf einen Anteil von weniger als 40% absinkt. Bei der maximalen Blocklänge beträgt der Basisabflussanteil lediglich etwas mehr als 20%. Der Oberflächenabfluss steigt etwas langsamer an als in den Szenarien davor, jedoch erreicht dieser einen maximalen Anteil von knapp 35%. Nach etwa 30 Stunden steigt der Zwischenabfluss sehr stark an und überschreitet bereits nach einer Blocklänge von 35 Stunden den Anteil an Basisabfluss. Der Oberflächenabfluss ist nach 40 Stunden nicht mehr vorhanden. Für die maximale Blocklänge liegt der Anteil an Zwischenabfluss bei fast 80% und dominiert die Abflussreaktion des Einzugsgebietes.



Abbildung 5.21: Abflusskomponenten des Oberflächen-, Zwischen- und Basisabflusses für das Einzugsgebiet der Brugga. Der Basisabfluss wurde als Mittelwert der BFI Kurven für das Szenario 4 abgeleitet.

Der Vergleich der Abflusskomponenten, mit den Modellierungsergebnissen von RoGeR für das Szenario mit 70 mm Niederschlag, einer Dauer von 24 h und einer Vorfeuchte von 90% ist in Abbildung 5.22 dargestellt. Die prozentuale Abweichung zu den Modellierungsergebnissen von RoGeR ist in Abbildung 5.23 wiedergegeben. Die geringste absolute Abweichung besitzt der Oberflächenabfluss, welcher ungefähr 4 bis 5% unter der Modellierung von RoGeR liegt. Prozentual führt dies zu einer Abweichung von circa 80% und einer großen Unterschätzung des Oberflächenabfluss mit der BFI Methode. Der Basisabfluss besitzt die geringste prozentuale Abweichung, welche jedoch fast 70% unterhalb der Ergebnisse von RoGeR liegt. RoGeR simuliert einen Basisabflussanteil von fast 85%. Der Anteil des Basisabflusses am Gesamtabfluss, welcher mit der BFI Methode ermittelt wurde, führt zu einem Wert von etwa 55%. Noch größer ist die absolute Abweichung des Zwischenabflusses, welche

bei fast 40% liegt. Dies liegt daran, dass RoGeR einen Wert von knapp 10% simuliert, jedoch die angewandte Abflusskomponententrennung zu einem Anteil von 45% führt. Daraus resultiert die höchste prozentuale Abweichung, welche bei fast 500% liegt. Der Zwischenabfluss der BFI Methode wird im Vergleich zu der Modellierung mit RoGeR deutlich überschätzt.



Abbildung 5.22: Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 4 und das Einzugsgebiet der Brugga.



Abbildung 5.23: Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 4 und das Einzugsgebiet der Brugga. Die Abweichung ist logarithmisch dargestellt.

5.6 Gebietszusammenfassung

5.6.1 Mittelung aus den Szenarien

Der Vergleich der Abflusskomponenten aus allen BFI Kurven und den gemittelten Modellierungsergebnissen von RoGeR wurde nicht nur für die einzelnen Gebiete durchgeführt, sondern auch für alle Gebiete zusammengefasst. Die Ergebnisse der Analyse sind in Abbildung 5.24 dargestellt. Auch die prozentualen Abweichungen wurden für jedes Gebiet berechnet und sind in Abbildung 5.25 wiedergegeben.



Abbildung 5.24: Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven für alle Events mit den gemittelten RoGeR Abflusskomponenten aus allen vier Szenarien für alle 26 Untersuchungsgebiete.

Dabei zeigt sich, dass der Horton'sche Oberflächenabfluss in allen Untersuchungsgebieten mit RoGeR höher modelliert als dieser mit den BFI Kurven berechnet wurde. In einigen Gebieten ist die absolute Abweichung gering und beträgt lediglich 3-4%. Andere Gebiete werden jedoch deutlich unterschätzt. Das Gebiet der Neumagen im Untermünstertal besitzt die größte absolute und prozentuale Abweichung des Oberflächenabflusses. Der modellierte Wert aus RoGeR liegt bei ungefähr 10%, jedoch ergibt die Abflusskomponententrennung mit den BFI Kurven lediglich einen Anteil von knapp 3%. Dies führt zu einer prozentualen Abweichung von fast 340%. Die meisten anderen Gebiete liegen bei einer prozentualen Abweichung von 80 bis 100%. Das Gebiet des Zulaufs zum Ölbach besitzt mit knapp 45% die geringste prozentuale Abweichung aller Untersuchungsgebiete.



Abbildung 5.25: Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven für alle Events mit den gemittelten RoGeR Abflusskomponenten aus allen vier Szenarien für alle 26 Untersuchungsgebiete.

Der Zwischenabfluss wird durch die Analyse der BFI Kurven bei allen Untersuchungsgebieten deutlich überschätzt. Das Einzugsgebiet der Brugga besitzt die geringste absolute und prozentuale Abweichung. Die Modellierung von RoGeR ergab einen Zwischenabflussanteil von knapp 27%, während die Analyse der BFI Kurven einen von etwa 49% ausgibt. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von fast 84%. Des Weiteren treten mehrere Untersuchungsgebiete auf, welche eine Abweichung von mehr als

2000% besitzen. Die größte Abweichung zwischen der BFI Kurvenanalyse und der Modellierung mit RoGeR besitzt das Gebiet der Speltach, welches eine prozentuale Abweichung von knapp 2750% besitzt. Der modellierte Zwischenabfluss von RoGeR liegt dabei bei 2,5%, jedoch werden mehr als 70% Zwischenabfluss mit den BFI Kurven berechnet.

Der Basisabfluss wird im Vergleich zu der Modellierung mit RoGeR in 25 der 26 Untersuchungsgebieten unterschätzt. Das Gebiet des Brehmbachs überschätzt als einziges Einzugsgebiet den Basisabfluss und zeichnet sich durch die geringste absolute und prozentuale Abweichung aus. Die Ergebnisse aus RoGeR weisen einen Basisabfluss von fast 62% und die Analyse der BFI Analyse ergibt einen Anteil von etwas mehr als 63%. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 2,6%. Das Untersuchungsgebiet mit der größten Abweichung ist der Friesenheimer Dorfbach. RoGeR modelliert einen Basisabfluss von 81%, während die Kurvenanalyse des BFI etwas mehr als 21% abbildet. Dies stellt eine Abweichung von fast 400% dar.

Die prozentuale Abweichung des Horton'schen Oberflächenabfluss wird in Karte 5.1 für alle Untersuchungsgebiete räumlich über ganz Baden-Württemberg dargestellt. Dabei zeigt sich, dass fast alle Einzugsgebiete der Kategorie 4 angehören und damit eine Abweichung von mehr als 50% besitzen. Die genaueste Übereinstimmung zwischen den beiden Methoden besitzen die Gebiete der Rottum und des Zulaufs zum Ölbach im Südosten von Baden-Württemberg, welche der Kategorie 3 angehören. Das Einzugsgebiet der Kirnach am Rande des Schwarzwalds und der Fichtenberger Rot im Nordosten von Baden-Württemberg gehören zwar der Kategorie 4, jedoch liegt die Abweichung nur knapp über 50%. Diese Gebiete zeichnen sich dadurch aus, dass sie alle in den eher flacheren Bereichen von Baden-Württemberg liegen.

Die größten Abweichungen besitzen die Gebiete der Lindach und Lauter, welche sich im mittleren Teil der Schwäbischen Alp befinden. Auch die Untersuchungsgebiete der Bühlot oder Hasel weisen große prozentuale Abweichungen auf. Diese Einzugsgebiete befinden sich zum Teil im Hochschwarzwald als auch in der Oberrheinebene. Insgesamt ist kein klares räumliches Muster bei der Unterteilung der Kategorien zu erkennen.

Die prozentuale Abweichung zwischen dem berechneten Basisabfluss aus den BFI Kurven und der Modellierung mit RoGeR wird in Karte 5.2 räumlich über ganz Baden-Württemberg wiedergegeben. Das Untersuchungsgebiet des Brehmbachs im nördlichen Baden-Württemberg besitzt mit Abstand die größte Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus RoGeR und wird der Kategorie 1 zugeordnet. Aber auch viele Gebiete im Hochschwarzwald und einige wenige auf der Schwäbischen Alp oder im Südosten von Baden-Württemberg sind der Kategorie 3 zuzuordnen. Das kleinste Untersuchungsgebiet des Weiherbachs im Nordwesten von Baden-Württemberg besitzt mit der Kategorie 2 eine ebenfalls geringe prozentuale Abweichung.

Ergebnisse



Karte 5.1: Prozentuale Abweichung des Horton'schen Oberflächenabflusses in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus allen BFI Kurven berechnet.

Die größten Abweichungen besitzen die Gebiete des Friesenheimer Dorfbachs und der Kirnach am Rande des Hochschwarzwalds. Des Weiteren sind viele Gebiete in der Mitte, im Süden oder Osten von Baden-Württemberg der höchsten Kategorie für die prozentuale Abweichung zuzuordnen. Insgesamt wird eine räumliche Tendenz für die Verteilung der Kategorien des Basisabfluss über Baden-Württemberg klar ersichtlich.

Ergebnisse



Karte 5.2: Prozentuale Abweichung des Basisabflusses in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus allen BFI Kurven berechnet.

Die prozentuale Abweichung des Zwischenabflusses für alle Untersuchungsgebiete wird in Karte 5.3 räumlich dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass alle Untersuchungsgebiete der Kategorie 4 zuzuordnen sind und eine große Abweichung von mehr als 50% zu den Ergebnissen von RoGeR besitzen. Das Einzugsgebiet der Brugga weist die geringste prozentuale Abweichung aller Untersuchungsgebiete auf. Nachfolgend besitzen die Gebiete der Neumagen, Acher und Elz die geringsten prozentualen Abweichungen. Diese vier Einzugsgebiete zeichnen sich durch ihre Lage im Hochschwarzwald im Westen von Baden-Württemberg aus.

Die größten prozentualen Abweichungen besitzen die Untersuchungsgebiete der Speltach, Lauter, Fichtenberger Rot und Lindach. Diese Gebiete sind durch ihre Lage in der Mitte und Nordosten von

Baden-Württemberg charakterisiert und liegen größtenteils auf der Schwäbischen Alp. Dies zeigt deutlich, dass ein klares räumliches Verteilungsmuster für den Zwischenabfluss vorhanden ist.



Karte 5.3: Prozentuale Abweichung des Zwischenabflusses in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus allen BFI Kurven berechnet.

5.6.2 Szenario 3

Der Vergleich der Abflusskomponenten aus der RoGeR Modellierung und den BFI Kurven, welche dem Szenario mit einer Niederschlagshöhe von 70 mm, einer Dauer von 24 Stunden und einer Vorfeuchte von 30% entsprechen, wird in Abbildung 5.26 dargestellt. Die prozentuale Abweichung der beiden Analysen ist in Abbildung 5.27 wiedergegeben. Für dieses Szenario lagen lediglich die BFI Kurven von 24 Untersuchungsgebieten vor, da für das Gebiet des Krähenbachs und der Umlach keine passenden BFI Kurven separiert werden konnten.



Abbildung 5.26: Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 3 und den 24 vorhandenen Untersuchungsgebieten.

Der Oberflächenabfluss weist ein sehr differenziertes Muster auf, wobei die Untersuchungsgebiete den Anteil sowohl über- als auch unterschätzen. Die größte Unterschätzung besitzt das Gebiet der Bühlot, welches mit einem Oberflächenabflussanteil von 9,6% für die Modellierung mit RoGeR und etwa 1% mit der BFI Kurvenanalyse eine prozentuale Abweichung von fast 1000% besitzt. Das Einzugsgebiet des Brehmbachs weist die größte Überschätzung mit der Analyse des BFI auf. Der Anteil des Oberflächenabflusses liegt in diesem Fall bei mehr als 15%, während die Modellierung mit RoGeR lediglich 6,5% ausgibt. Die geringste prozentuale Abweichung aller Untersuchungsgebiete besitzt die Fichtenberger Rot, welche im Vergleich der beiden Abflusskomponenten um 4,7% abweicht. RoGeR gibt dabei einen Wert von 10,4% und die BFI Kurvenanalyse einen Wert von 9,9% aus.

Der Zwischenabfluss, welcher aus den BFI Kurven berechnet wurde, wird im Vergleich zu der Modellierung von RoGeR bei allen 24 Gebieten überschätzt. Dabei besitzt das Gebiet des Friesenheimer Dorfbachs die größte absolute und prozentuale Abweichung aller Untersuchungsgebiete. RoGeR modelliert einen Wert von 2,5%, jedoch wurde mit den BFI Kurven für das vorhandene Szenario ein Zwischenabflussanteil von 78% berechnet. Dies stellt eine prozentuale Abweichung von mehr als 3000% dar. Das am besten übereinstimmenden Gebiet ist der Brehmbach. Dieser besitzt einen von RoGeR modellierten Zwischenabfluss von fast 6% und einen aus den BFI Kurven berechneten Anteil von knapp 21%. Dies stellt eine prozentuale Abweichung von mehr als 260% dar. Insgesamt zeigen alle Untersuchungsgebiete eine deutliche Überschätzung des Zwischenabflusses.
4 Prozentuale Abweichung [%] N 0 Υ 4 HOF 4 Prozentuale Abweichung [%] N 0 Ņ 4 SSF 4 Prozentuale Abweichung [%] N 0 Υ 4 Basisabfluss

Ergebnisse

Abbildung 5.27: Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 3 und den 24 vorhandenen Untersuchungsgebieten. Die Abweichung ist logarithmisch dargestellt.

Der Basisabfluss wird im Vergleich der BFI Kurvenanalyse und der Modellierung von RoGeR bei allen Untersuchungsgebieten unterschätzt. Das Gebiet, für welches die Berechnung von den BFI Kurven am Genauesten mit der Modellierung von RoGeR übereinstimmt, ist der Brehmbach. Die BFI Kurvenanalyse errechnet einen Basisabfluss von fast 76%, wobei sich bei der Modellierung mit RoGeR ein Basisabfluss von knapp 82% ergab. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von ungefähr

8%. Das Einzugsgebiet der Speltach besitzt nach der BFI Kurvenmethode einen Basisabflussanteil von 6,5%. RoGeR hingegen gibt einen Basisabfluss von mehr als 84% aus. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von fast 1200%. Dies stellt die größte absolute und prozentuale Abweichung bei allen Untersuchungsgebieten dar.



Karte 5.4: Prozentuale Abweichung des Horton'schen Oberflächenabfluss in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 24 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 3 berechnet.

Die prozentuale Abweichung des Horton'schen Oberflächenabflusses zu der Modellierung mit RoGeR für die 24 vorhandenen Untersuchungsgebiete des Szenario 3 wird in Karte 5.4 räumlich wiedergegeben. Dabei stechen vor allem die beiden Einzugsgebiete der Fichtenberger Rot und Rems im Nordosten von Baden-Württemberg hervor, da diese der Kategorie 1 zuzuordnen sind. Die prozentuale Abweichung

wird durch eine Überschätzung von 5% für die Fichtenberger Rot und einer Unterschätzung des Zwischenabflusses von etwas mehr als 6% für die Rems wiedergegeben.

Die restlichen Gebiete gehören der Kategorie 3 oder 4 an und besitzen eine große prozentuale Abweichung im Vergleich mit der Modellierung von RoGeR. Dabei sind vor allem die Einzugsgebiete der Bühlot, Lindach und Umlach zu nennen. Diese weisen eine Abweichung auf, welche fast 800% unter den modellierten Ergebnissen mit RoGeR liegen. Ein räumliches Muster ist in diesen Ergebnissen nicht zu erkennen, da sowohl die Gebiete mit der besten als auch der schlechtesten Übereinstimmung in der Mitte oder dem Nordosten von Baden-Württemberg liegen.



Karte 5.5: Prozentuale Abweichung des Basisabflusses in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 24 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 3 berechnet.

In Karte 5.5 wird die prozentuale Abweichung des Basisabflusses zwischen der Berechnung aus den BFI Kurven und der Modellierung von RoGeR räumlich für das Szenario 3 dargestellt. Auffällig ist dabei, dass die beiden nördlichsten Gebiete die größte Übereinstimmung besitzen. Diese Gebiete sind der Brehmbach und der Weiherbach. Des Weiteren gibt es einige Gebiete der Kategorie 3, welche sich über ganz Baden-Württemberg verteilen.

Die restlichen Gebiete sind der Kategorie 4 zuzuordnen. Dabei sind vor allem der Zulauf des Ölbachs, die Rems und die Speltach zu nennen, welche sich im östlichen Teil von Baden-Württemberg befinden und bis zu 1200% von den Modellierungsergebnissen von RoGeR abweichen. Trotz dieser Tendenzen gibt es kein einheitliches Muster in der Verteilung der Klassen über Baden-Württemberg.



Karte 5.6: Prozentuale Abweichung des Zwischenabflusses in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 24 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 3 berechnet.

Die prozentuale Abweichung des Zwischenabflusses für die 24 Untersuchungsgebiete, welche BFI Kurven für das dritte Szenario besitzen, wird in Karte 5.6 räumlich für ganz Baden-Württemberg dargestellt. Dabei fällt auf, dass alle Einzugsgebiete der Kategorie 4 zugeordnet sind und eine Abweichung von mehr als 50% zu der Modellierung von RoGeR besitzen. Der Brehmbach im Norden von Baden-Württemberg besitzt die geringste Abweichung aller Gebiete. Auf den nachfolgenden Plätzen befinden sich die Brugga, Stunzach und Schutter, welche sich im Südwesten und der Mitte von Baden-Württemberg befinden.

Die größten prozentualen Abweichungen weisen die Untersuchungsgebiete des Friesenheimer Dorfbachs und der Speltach auf. Die Abweichungen betragen fast 3000% zu der Modellierung mit RoGeR. Aber auch die Fichtenberger Rot oder der Zulauf zum Ölbach besitzen sehr große Abweichungen. Die Gebiete befinden sich in jeder landschaftstechnischen Einheit und Richtung in ganz Baden-Württemberg, wodurch es nicht möglich ist ein räumliches Muster zu erkennen.

5.6.3 Szenario 4

Der Vergleich der Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit der Modellierung von RoGeR für das Szenario mit einer Niederschlagshöhe von 70 mm, einer Dauer von 24 Stunden und einer nutzbaren Feldkapazität von 90% ist in Abbildung 5.28 wiedergegeben. Die prozentuale Abweichung der einzelnen Abflusskomponenten für die 25 Untersuchungsgebiete, für welche BFI Kurven separiert werden konnten, ist in Abbildung 5.29 dargestellt. Für das Gebiet der Lindach konnten keine entsprechenden BFI Kurven separiert werden, wodurch es aus der Analyse entfernt wurde.

Der Horton'sche Oberflächenabfluss wird für den größten Teil der Untersuchungsgebiete unterschätzt, jedoch gibt es auch einige Einzugsgebiete, für welche der Oberflächenabfluss überschätzt wird. Die größte Überschätzung eines Untersuchungsgebietes besitzt die Deggenhausener Aach. RoGeR gibt einen Abflussanteil von knapp 13% aus, während die Analyse der BFI Kurven einen Oberflächenabfluss von etwa 25% ergibt. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von knapp 100%. Die größte Unterschätzung des Oberflächenabflusses, welche in etwa einem Anteil von 950% entspricht, weist das Einzugsgebiet der Bühlot auf. Die Analyse der BFI Kurven gibt einen Anteil von ungefähr einem Prozent aus, wobei RoGeR einen Horton'schen Oberflächenabfluss von knapp 10% modelliert. Die größte Übereinstimmung zwischen RoGeR und der BFI Kurvenanalyse besitzt das Untersuchungsgebiet der Rottum. Die prozentuale Abweichung liegt bei lediglich 5%, da RoGeR einen Anteil von 12,3% und die Analyse der BFI Kurven von fast 13% ausgibt.



Abbildung 5.28: Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 4 und den 25 vorhandenen Untersuchungsgebiete.

Der Zwischenabfluss wird mit der Analyse der BFI Kurven für die meisten Untersuchungsgebiete überschätzt und für einige wenige Einzugsgebiete unterschätzt. Die beste Übereinstimmung von RoGeR und der BFI Kurvenanalyse besitzt das Gebiet der Elz. RoGeR modelliert einen Zwischenabflussanteil von etwas mehr als 47%. Der Wert der BFI Kurvenanalyse liegt bei ungefähr 43% und entspricht einer prozentualen Abweichung von etwa 9%. Die größte absolute und prozentuale Abweichung besitzt das Gebiet der Fichtenberger Rot. Der Zwischenabflussanteil von RoGeR liegt bei 2,5%, während der Zwischenabfluss der BFI Kurven mit knapp 76% angeben wird. Dies entspricht einer Überschätzung von fast 3000%.

Der Basisabfluss wird im größten Teil der Einzugsgebiete unterschätzt, jedoch auch in drei Untersuchungsgebieten überschätzt. Die größte Abweichung des Basisabflusses besitzt das Gebiet der Stunzach. Da die BFI Kurvenanalyse einen Anteil von etwas mehr als 11% ausgibt und die Modellierung von RoGeR bei fast 65% liegt, beträgt die prozentuale Abweichung dieser beiden Methoden ungefähr 500%. Die größte Übereinstimmung der beiden Analysen besitzt das Einzugsgebiet der Brugga. RoGeR berechnet einen Anteil von etwa 38,5%, während die BFI Kurvenanalyse einen Basisabflusses von 36,5% ausgibt. Dies führt zu einer prozentualen Abweichung und Unterschätzung des Basisabflusses von 5,7%.



Abbildung 5.29: Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 4 und den 25 vorhandenen Untersuchungsgebiete. Die Abweichung ist logarithmisch dargestellt.

In Karte 5.7 wird die prozentuale Abweichung des Horton'sche Oberflächenabfluss zwischen der Analyse der BFI Kurven und der Modellierung von RoGeR räumlich wiedergegeben. Diese wurden für die 25 vorhandenen Untersuchungsgebiete des Szenario 4 berechnet. Dabei stechen vor allem die Einzugsgebiete des Brehmbachs im Norden und der Rottum im Südosten von Baden-Württemberg

hervor, da diese der Kategorie 1 zugehörig sind. Des Weiteren finden sich mehrere Untersuchungsgebiete der Kategorie 2 oder 3 in der Mitte und im Osten von Baden-Württemberg.

Die restlichen Gebiete sind der Klasse 4 zuzuordnen. Dabei fallen die Untersuchungsgebiete der Bühlot und des Friesenheimer Dorfbachs durch eine starke Unterschätzung des Oberflächenabflusses auf. Die Gebiete befinden sich beide im Hochschwarzwald im Westen von Baden-Württemberg. Das Einzugsgebiet der Deggenhausener Aach, welche sich im Süden von Baden-Württemberg befindet, fällt durch eine große Unterschätzung des Oberflächenabflusses auf. Durch die gute Übereinstimmung der Untersuchungsgebiete im Norden und Osten, sowie einer geringen Übereinstimmung im Westen und Süden kann von einem klaren räumlichen Muster für die prozentuale Abweichung des Oberflächenabflusses ausgegangen werden.



Karte 5.7: Prozentuale Abweichung des Horton'schen Oberflächenabflusses in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 4 berechnet.

Die prozentuale Abweichung des Basisabflusses zwischen der BFI Kurvenanalyse und der Modellierung von RoGeR für alle 25 vorhandenen Untersuchungsgebiete des Szenarios 4 sind in Karte 5.8 räumlich dargestellt. Die größte Übereinstimmung besitzt das Gebiet der Brugga im Südwesten von Baden-Württemberg, da dieses als einziges Einzugsgebiet der Klasse 1 angehört. Des Weiteren liefern die Untersuchungsgebiete des Brehmbachs im Norden, des Weiherbachs im Nordwesten und der Elz im Westen von Baden-Württemberg gute Ergebnisse. Auch viele Gebiete des Hochschwarzwaldes gehören der Klasse 3 an und besitzen eine relativ geringe Abweichung.



Karte 5.8: Prozentuale Abweichung des Basisabflusses in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 4 berechnet.

Die größten prozentualen Abweichungen besitzen die Untersuchungsgebiete im Süden und Osten, sowie in der Mitte von Baden-Württemberg. Dabei sind vor allem die Stunzach, die Fichtenberger Rot und die

Speltach zu nennen, welche allesamt der Kategorie 4 zugeordnet sind. Dies verdeutlicht das klar erkennbare räumliche Muster mit verhältnismäßig guten Ergebnissen im Norden und Westen und schlechteren Übereinstimmungen im restlichen Teil von Baden-Württemberg.



Karte 5.9: Prozentuale Abweichung des Zwischenabflusses in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 4 berechnet.

Die Karte 5.9 stellt die prozentuale Abweichung zwischen der Modellierung aus RoGeR und der Analyse der BFI Kurven für das Szenario 4 und die dazugehörigen Einzugsgebiete räumlich über ganz Baden-Württemberg dar. Die größte Übereinstimmung besitzt das Einzugsgebiet der Elz im Hochschwarzwald und Westen von Baden-Württemberg. Dieses wird der Klasse 1 zugeteilt. Das Untersuchungsgebiet der Brugga wird durch die Klasse 2 charakterisiert. Auch die Gebiete der Steina

und Neumagen im Südwesten von Baden-Württemberg liefern gute Ergebnisse, wodurch sie zu der Klasse 3 gezählt werden.

Der größte Teil der Untersuchungsgebiete ist jedoch der Kategorie 4 zuzuordnen. Dabei stechen vor allem das Einzugsgebiet der Teinach, der Fichtenberger Rot und der Speltach hervor. Diese befinden sich räumlich in der Mitte und dem Nordosten von Baden-Württemberg. Dadurch zeigt sich eine klare räumliche Tendenz bei der prozentualen Abweichung des Zwischenabflusses, weil die Gebiete im Hochschwarzwald im Südwesten von Baden-Württemberg deutlich übereinstimmender mit der Modellierung von RoGeR berechnet werden.

6.1 Datenaufbereitung

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist die Anzahl und Lage der Messstationen zu beachten, da diese die Grundlage für die Analyse darstellen. Für die Untersuchungsgebiete der Deggenhausener Aach und der Lindach lagen jeweils nur eine Niederschlagsmessstation vor. Dies stellt ein großes Problem dar, da die Einzugsgebiete eine Fläche von fast 75 km² und 96 km² besitzen. Konvektive Starkniederschläge treten in den Sommermonaten zwar häufig auf, jedoch nur sehr kleinräumig und lokal begrenzt. Außerdem besitzen die Starkniederschläge eine kurze Dauer und lösen sich schnell wieder auf. Dies kann dazu führen, dass Teilgebiete des Einzugsgebietes eine starke Abflussreaktion zeigen, aber an der Klimamessstation kein Niederschlag fällt. Auch der gegenteilige Fall ist möglich. Dabei liegt die Niederschlagsstation im Zentrum eines konvektiven Starkregens, jedoch ist der größte Teil des Untersuchungsgebietes davon nicht betroffen. Dies führt zu einer deutlich überschätzten Abflussreaktion, da das restliche Einzugsgebiet keine Reaktion aufweist oder sogar die Abflussreaktion des Teilgebietes abschwächt und verlangsamt. Im Falle der Deggenhausener Aach ist die Ausgangssituation noch etwas besser als bei der Lindach, da die Messstation innerhalb des Einzugsgebiets liegt. Bei der Lindach liegt die Klimastation fast 6,5 Kilometer südöstlich des Untersuchungsgebietes. Dadurch stellt sich die Frage, wie repräsentativ diese Klimastation für die Messung von kleinräumigen Starkniederschlägen innerhalb des 96 km² großen Einzugsgebietes ist.

Des Weiteren spielt die Höhe der Messstationen eine wichtige Rolle für die Evaluierung der Ergebnisse. Dies lässt sich besonders gut am Beispiel des Friesenheimer Dorfbachs erläutern. Die mittlere Gebietshöhe liegt bei 326 Metern über Normalnull. Vereinzelte Berge können auch eine Höhe von fast 600 Metern erreichen. Die Messstationen liegen jedoch nur auf 155 und 186 Metern Höhe. Da der Niederschlag einen starken Höhengradient besitzt und orographische Effekte den Niederschlag beeinflussen können, ist es wichtig die Höhenverteilung eines Einzugsgebietes möglichst vollständig zu erfassen. Das Gleiche gilt auch für die Schneehöhe, da diese sehr stark mit der Gebietshöhe korreliert. Ein Korrekturfaktor kann zwar genutzt werden, besitzt jedoch eine große Fehlertoleranz und hohe Unsicherheiten.

Außerdem besitzen die Zeitreihen aus einigen Untersuchungsgebieten eine relativ kurze Dauer. Dies kann am Beispiel der Lindach verdeutlicht werden. Die Abflussdaten für dieses Untersuchungsgebiet reichen von Anfang 1969 bis Ende 2009. Die Niederschlagsdaten des Einzugsgebietes der Lindach beginnen jedoch erst im September 2005 und reichen bis Ende 2017. Dies bedingt, dass es nur einen kleinen Überschneidungsbereich der Zeitreihen gibt, wodurch sich die Datengrundlage auf etwas mehr als vier Jahre beschränkt. Dies kann dazu führen, dass diese Jahre in besonders nasse oder trockene Klimaperioden fallen, wodurch nur wenige Starkniederschläge oder viele hohe Abflussereignisse vorliegen können. Durch eine längere Zeitreihe würde sich der Fehler der Klimavariabilität ausgleichen und sowohl Trocken- als auch Feuchtperioden vorliegen, welche für die Analyse genutzt werden

können. Noch komplizierter kann diese Situation durch das Aufnehmen der Schneedaten in die Analyse werden, da viele Schneemessstationen in den letzten Jahrzehnten aufgegeben oder verlagert wurden. Da hochaufgelöste Niederschlagsdaten meist nur wenige Jahre vorliegen und nicht verlängert werden können, kann versucht werden die Abflusszeitreihe zu erweitern. Dies ist möglich, wenn der Messpegel nicht vollständig aufgegeben, sondern an einen anderen Punkt des Untersuchungsgebietes verlegt wurde. Dies ist z.B. für das Gebiet der Lindach der Fall, jedoch ändert sich durch eine Pegelverlagerung auch die Größe des Einzugsgebietes, wodurch ein Korrekturfaktor mit den Messwerten verrechnet werden muss. Dieses Vorgehen ist sehr fehleranfällig und fand deshalb in dieser Analyse keine Anwendung.

Es wäre deshalb wünschenswert, dass die Anzahl an Messstationen weiter erhöht wird. Für den Niederschlag und die Schneehöhe liegen insgesamt zwar viele Messstationen vor, jedoch besitzen diese meist nur eine zeitliche Auflösung von einem Tag. Es wäre deshalb erstrebenswert, die bestehenden Messstationen zu modernisieren, um eine höhere zeitliche Auflösung der Daten zu ermöglichen. Dabei sollte nicht nur eine stündliche zeitliche Auflösung angestrebt werden, sondern 5- oder 15-Minuten Intervalle, um die kurzen Starkniederschläge besser erfassen zu können. Außerdem können durch mehr Abflussmessstationen auch die Reaktionen der Teileinzugsgebiete analysiert werden. Dadurch können die gefährdetsten Regionen eines Einzugsgebietes besser abgeschätzt werden und Maßnahmen konkreter getroffen werden. Des Weiteren sollten die bestehenden Pegel modernisiert werden, um eine höhere zeitliche Auflösung zu ermöglichen. Diese sollte im besten Fall genauso wie für den Niederschlag in 5- oder 15-minütigen Intervallen vorliegen.

Eine weitere Lösung der beschriebenen Probleme würde in dem Einsatz von Radardaten des Niederschlages liegen. Radardaten des DWDs besitzen eine hohe zeitliche Auflösung von 15 Minuten oder einer Stunde und liegen räumlich für ganz Baden-Württemberg vor. Dadurch würde eine Interpolation der Punktdaten der Klimastationen auf die Fläche des Einzugsgebietes entfallen und die Niederschlagsdaten würden repräsentativer für das gesamte Einzugsgebiet werden. Jedoch würde dies eine deutlich größere Rechenkapazität und mehr Speicherplatz benötigen. Außerdem besitzen die Radardaten einige Messunsicherheiten, welche zum Beispiel durch Abschattungseffekte an Bergen entstehen können. Eine Kombination aus Messstationen und Radardaten würde deswegen die genauesten Niederschlagsdaten liefern, jedoch war dies im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

6.2 Ereignisseparation

Die Ereignisseparation stellt weiterhin ein großes Problem in der Hydrologie dar. Der Beginn eines Ereignisses ist meist sehr genau durch den ansteigenden Ast des Hydrographen festgelegt. Jedoch kann es zu Problemen kommen, wenn ein Ereignis aus mehreren Peaks besteht. Dieser Fall liegt vor, wenn nach dem ersten Peak die Rezession beginnt und diese schon weit vorangeschritten, aber nicht beendet

ist, bevor das eigentliche Ereignis beginnt. Als Grenzwert für die Zeit zwischen zwei Niederschlagsereignissen wurde ein Wert von 12 Stunden gewählt. Dies bedeutet, dass mehr als 12 Stunden zwischen den beiden Ereignissen liegen müssen, damit diese separat betrachtet werden. Bei einer Dauer von weniger als 12 Stunden werden die beiden Niederschläge zusammengefasst und der erste Anstieg des Hydrographen definiert den Startzeitpunkt des Ereignisses. Die Wahl des Grenzwertes kann individuell variiert werden und hat einen großen Einfluss auf die Bestimmung des Startzeitpunktes.

Noch schwieriger gestaltet sich die Definition des Endzeitpunktes eines Ereignisses. In dieser Arbeit wurde das Ende eines Ereignisses als Zeitpunkt festgelegt, bei welchem der gesamte Abfluss wieder aus Basisabfluss besteht. Durch diese Methode kann es vorkommen, dass ein Ereignis sehr lange andauert, wenn die Rezession des Abflusses durch weitere Niederschläge unterbrochen wird. Dies kann vor allem bei Ereignissen mit mehreren Abflussspitzen und in den Wintermonaten vorkommen. Außerdem spielt die Berechnungsmethode für den Basisabfluss eine große Rolle bei der Ereignisseparation, wodurch unterschiedliche Berechnungsansätze zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen können.

Dies verdeutlicht außerdem der Vergleich mit den berechneten Einheitsganglinien. Die Einheitsganglinien im Einzugsgebiet der Brugga besitzen eine maximale Dauer von rund 200 Stunden, wobei nach 50 Stunden kein Oberflächen- und nur noch geringe Mengen an Zwischenabfluss eine Rolle spielen. Jedoch erreichen die längsten separierten Ereignisse eine Dauer von mehr als 500 Stunden. Aus diesem Grund wurden die Länge der BFI Kurven des Brugga Einzugsgebietes auf die 200 Stunden der Einheitsganglinien reduziert, jedoch erscheint auch diese Ereignisdauer noch sehr hoch. Dies liegt an der morphologischen Struktur des Einzugsgebietes. Dieses besitzt keine längliche Form und ist durch steile Hänge geprägt, welche eine hohe Fließgeschwindigkeit des Zwischenabflusses zum Vorfluter ermöglichen und dadurch zu kurzen Ereignissen führen. Die separierten Niederschlags-Abfluss Ereignisse sollten aus diesen Gründen kritisch hinterfragt werden und gegebenenfalls Korrekturen an der Methodik vorgenommen werden.

6.3 Variation der Blockgröße

Die Wahl der Blockgröße hat einen entscheidenden Einfluss auf die Berechnung des Basisabflusses bei der in dieser Arbeit genutzten UKIH Methode. Die Blockgröße ist der entscheidende Faktor, ob die ausgegebenen Ergebnisse der Modellierung des Basisabfluss realistisch oder unplausibel sind. Zu kleine Blocklängen erlauben eine dynamische Reaktion des Basisabflusses auf die Niederschlagsereignisse. Dies führt dazu, dass der Basisabfluss einen sehr großen Anteil am Gesamtabfluss einnimmt, wodurch der Oberflächen- oder Zwischenabfluss unterrepräsentiert werden. Der Basisabfluss reagiert in der Natur meist langsam und träge auf Abflussereignisse, wodurch eine schnelle Reaktion in den meisten Einzugsgebieten nicht den natürlichen Verhältnissen entsprechen kann. Bei zu großen Blocklängen reagiert der Basisabfluss sehr langsam, wodurch dieser einen geringen Anteil am Gesamtabfluss

während eines Ereignisses einnimmt. Dies bedingt, dass der Oberflächen- und der Zwischenabflussanteil für ein Ereignis stark erhöht sind und sehr lange andauern können. Ein Auftreten von Zwischenabfluss über mehr als 40 Tage (vgl. Einzugsgebiet der Brugga) erscheint in den meisten Einzugsgebieten nicht den natürlich vorherrschenden Bedingungen zu entsprechen.

Dies bedeutet des Weiteren, dass es für jedes Untersuchungsgebiet eine Blocklänge gibt, welche die natürlichen Bedingungen am besten repräsentiert. Die Blocklänge der UKIH Methode ist für die meisten Untersuchungsgebiet mit einer Dauer von fünf Tagen festgelegt. Der wesentliche Vorteil dieses Vorgehens liegt in der Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus verschiedenen Gebieten, jedoch spielen wichtige Faktoren wie die Größe und Morphologie, die Böden und Geologie oder die Landnutzung des Einzugsgebietes keine Rolle bei der Berechnung des Basisabflusses. Durch die Variation der Blockgröße und der Berechnung des Basisabflusses für diese Szenarien kann die Blocklänge bestimmt werden, welche die am nächsten an der Realität liegenden Ergebnisse liefert. Dies kann sogar soweit geführt werden, dass für verschiedene Niederschlagsereignisse und Vorfeuchtebedingungen unterschiedliche Blocklängen für die Abschätzung des Basisabflusses herangezogen werden. Dieses Vorgehen sollte jedoch durch Feldmessungen oder weitere Modellierungsergebnisse unterstützt werden, um die Genauigkeit der Abschätzungen zu verbessern.

Die ausgewählten Methoden in dieser Arbeit, welche zur Separation von Niederschlags-Abfluss Ereignissen genutzt werden, führen zu verhältnismäßig lang andauernden Ereignissen. Dies bedingt große Blocklängen der BFI Methode, wobei der Basisabfluss mit zunehmender Blocklänge kontinuierlich absinkt. Der Oberflächenabfluss ist nur für kleine Blocklängen in der Lage die Differenz zwischen dem Basis- und Gesamtabfluss aufzufüllen. Durch das schnelle Auftreten und Absinken des Oberflächenabflusses kann dieser nicht für große Blocklängen auftreten. Dies bedeutet, dass der Zwischenabfluss für große Blocklängen zwangsläufig ansteigen die muss. um Abflusskomponentenbilanz auszugleichen. Da die Abflusskomponenten für den Vergleich mit der Modellierung aus RoGeR zu einem Mittelwert über alle Blocklängen zusammengefasst werden, führt dies zu verhältnismäßig geringen Oberflächen- und Basisabflüssen und hohen Zwischenabflüssen. Eine kürzere maximale Blocklänge oder Ereignisseparation würde deswegen zu höheren Oberflächen- und Basisabflüssen und niedrigeren Zwischenabflüssen führen. Dies wurde auch durch den Vergleich der Abflusskomponenten aus allen BFI Kurven mit den Ergebnissen von RoGeR bestätigt, da der Oberflächenabfluss für fast alle Gebiete und Szenarien unterschätzt wurde. Der Basisabfluss wurde bis auf ein Gebiet ebenfalls unterschätzt. Der Zwischenabfluss wurde mit Ausnahme von einem Gebiet durchgehend überschätzt. Dies zeigt, dass die Separationsmethode einen großen Einfluss auf die Ereignisdauer die maximale Blocklänge bedingt bzw. und dadurch auf die Abflusskomponententrennung besitzt und mit Bedacht gewählt werden sollte.

Nachfolgend kann gesagt werden, dass die angewandten Methoden aus der Berechnung der BFI Kurven und der Kombination mit den Einheitsganglinien keine ausreichend genaue Auftrennung der

Abflusskomponenten ermöglicht hat. Stölzle et al. (unveröffentlicht) nutzten Wendepunkte oder ,Breakpoints', um die BFI Kurven aufzuteilen und Aussagen über die unterschiedlichen Abflusskomponenten treffen zu können. Diese Einteilung gestaltet sich jedoch schwierig, da die Wendepunkte je nach Ereignis, Anfangsbedingungen und Untersuchungsgebiet variieren. Es wäre dennoch interessant diesen Schritt zu wagen, um das volle Potential der BFI Kurven überprüfen zu können. Auch ein weiterer Vergleich mit der Modellierung von RoGeR wäre in diesem Falle angebracht und würde möglicherweise zu einer größeren Übereinstimmung der Ergebnisse führen.

6.4 Einheitsganglinien und Abflusskomponententrennung

Eine große Fehlerquelle dieser Arbeit liegt in der Berechnung der Einheitsganglinien und der Aufteilung der Abflusskomponenten. Für die Berechnung der Einheitsganglinien werden ausschließlich undynamische Parameter wie die Landnutzung, die Versiegelung, die Bodenmächtigkeit, das Gefälle und ein digitales Höhenmodell verwendet. Diese Parameter sind sehr träge und ändern sich meist nur über mehrere Jahre oder Jahrhunderte hinweg. Des Weiteren gibt es innerhalb der Landnutzungsklassen keine Unterscheidung der Strickler Koeffizienten oder Geschwindigkeitsverteilung. Dadurch erhält eine landwirtschaftliche Fläche, auf welcher Weizen angebaut wird, den gleichen Geschwindigkeitswert wie ein Sonderkulturfeld (z.B. Spargel). Auch allen Wäldern wird trotz unterschiedlichen Altersstrukturen und Untergehölzen der gleiche Strickler-Wert zugeordnet. Dies gilt in gleicher Weise für Flüsse oder Feuchtflächen, welche in ihrem Verlauf eine stark variierende Geschwindigkeitsverteilung besitzen. Dynamische Parameter wie die Bodenfeuchte, Niederschlagsmenge und -dauer werden für die Berechnung nicht verwendet. Wie in Kapitel 2.4.1 beschrieben wurde, spielt die Bodenfeuchte eine entscheidende Rolle für die Entstehung und die Geschwindigkeit des Zwischenabflusses. Die Niederschlagsmenge und -dauer haben einen großen Einfluss darauf, ob der Abfluss oberflächlich abfließt oder in den Boden infiltriert. Diese Faktoren werden mit der gewählten Einheitsganglinienmethodik nicht abgedeckt. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Einheitsganglinienmethode nicht dazu geeignet ist die komplexe Dynamik der Abflusskomponenten eines Untersuchungsgebietes korrekt aufzuteilen und zu analysieren.

Dieses Problem wird noch verdeutlicht, da die berechneten Einheitsganglinien eines Untersuchungsgebietes dazu genutzt werden, um die einzelnen Abflusskomponenten für verschiedene Szenarien aufzuteilen. Diese Szenarien zeichnen sich durch ihre variierenden Parameter der Bodenfeuchte, der Niederschlagsmenge und der Dauer der Niederschläge aus, während die Einheitsganglinien keinerlei Variation besitzen. Dies bedeutet, dass sich der Basisabfluss aufgrund der unterschiedlichen BFI Kurven verändert, wodurch auch der Anteil an Oberflächen- und Zwischenabfluss variiert. Dabei verändert sich jedoch nicht die Verteilung und das zeitliche Auftreten der beiden Komponenten. Dies bedeutet, dass der maximale Anteil an Oberflächenabfluss in allen Szenarien an der gleichen Stelle auftritt und lediglich der absolute Wert variiert, wodurch die

Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien gering ausfallen. Dabei spielen die Niederschlagsmenge, -dauer und Bodenfeuchte eine wichtige Rolle für die Abflussbildungsprozesse (vgl. Kapitel 2.3 und 2.4.1) und das zeitliche Auftreten der einzelnen Komponenten. Bei einer geringen Bodenfeuchte dauert es deutlich länger bis sich Zwischenabfluss bilden kann und der Anteil des Zwischenabflusses am Gesamtabfluss fällt deutlich geringer aus. Bei einer hohen Niederschlagsintensität und -dauer kann nicht der gesamte Niederschlag infiltrieren, wodurch das Auftreten des Oberflächenabflusses ein dominierender Faktor und der Zwischenabfluss vernachlässigbar klein wird.

Die zuvor beschriebenen Punkte zeigen deutlich, dass die unterschiedlichen Szenarien nicht durch eine konstante Einheitsganglinie abgebildet werden können. Es wäre deshalb wünschenswert mehrere Einheitsganglinien für die einzelnen Szenarien zu berechnen. Dies kann zum Beispiel für den Oberflächenabfluss erreicht werden, indem die Fließhöhe des Wassers auf der Bodenoberfläche vergrößert oder die Fließgeschwindigkeit der einzelnen Landnutzungsklassen erhöht werden. Dies führt zu einem schnelleren Auftreten des Oberflächenabflusses und einem höheren Anteil in den ersten Stunden nach einem Niederschlag. Für den Zwischenabfluss kann beispielhaft die Fließgeschwindigkeit im Untergrund erhöht werden, da bei einer höheren Bodenfeuchte eine bessere Konnektivität zwischen den Makroporen besteht. Auch die Fließtiefe des Wassers im Untergrund steigt durch große Niederschlagsmengen und eine lange Ereignisdauer an, wodurch sich die Wassermenge und Geschwindigkeit des Zwischenabflusses erhöht. Dies führt zu größeren Anteilen und einem früheren Auftreten des Zwischenabflusses bei einem Ereignis. Mit dieser Methode könnten die Unterschiede der einzelnen Szenarien besser hervorgehoben und die Ergebnisse realitätsnaher abgebildet werden.

Zu beachten ist ebenfalls, dass die ausgewählten Szenarien nicht exakt den Szenarien der RoGeR Modellierung entsprechen. Die Bodenfeuchte wurde über einen sehr einfachen Ansatz abgeleitet, welcher lediglich den Niederschlag aus den 21 Tagen vor dem Ereignis aufsummiert und in Verhältnis zu der zu erwartenden Niederschlagsmenge in diesem Zeitraum setzt. Dabei spielen die Jahreszeiten, die Verdunstung oder die unterschiedlichen Böden, Geologien und Morphologien der Untersuchungsgebiete keine Rolle. Der Ansatz ist deswegen mit großen Unsicherheiten zu betrachten sein und entspricht nicht den gewählten nutzbaren Feldkapazitäten von 30% und 90% aus der Modellierung mit RoGeR. Aber auch die Niederschlagsmenge und -dauer sind mit Unsicherheiten behaftet. Für die Niederschlagsdauer wurde eine Grenze von 24 Stunden gewählt, wodurch alle Ereignisse mit einer kürzeren Dauer zu der RoGeR Kategorie von einer Stunde gezählt wurden. Alle Ereignisse mit mehr als 24 Stunden Niederschlagsdauer wurden innerhalb der 24-stündigen RoGeR Kategorie definiert. Dazu zählen auch Ereignisse, welche über mehrere Tage andauern und mehr als 100 Stunden Niederschlagsdauer überschreiten. Für die Niederschlagsmenge wurde meist ein Grenzwert von 50 bis 70 mm variierend je nach Einzugsgebiet gewählt. Dies kann dazu führen, dass Ereignisse mit fast 200 mm Niederschlag über einen langen Zeitraum der 70 mm Niederschlagsklasse aus RoGeR

zugeordnet werden. Ein anderer Berechnungsansatz für die Bodenfeuchte könnte zu einer besseren Übereinstimmung mit den Modellierungsszenarien von RoGeR beitragen und dadurch die Vergleichbarkeit erhöhen.

Neben den Problemen bei der Unterscheidung der einzelnen Szenarien treten auch Probleme bei der Vergleichbarkeit der verschiedenen Untersuchungsgebieten auf. Dabei stellt die geringe Variation der Parameter, welche für die Einteilung der Ereignisse genutzt wurden, einen Kritikpunkt dieser Arbeit dar. Die Unterscheidung zwischen den einzelnen Untersuchungsgebieten wurde durchgeführt, da Einzugsgebiete im Hochschwarzwald eine höhere jährliche Niederschlagsmenge als Untersuchungsgebiete auf der Schwäbischen Alp oder den Neckar-Tauber Gäuplatten besitzen. Starkniederschläge treten in Gebieten mit einer großen Niederschlagsmenge häufiger und wahrscheinlicher auf als in den Bereichen von Baden-Württemberg, welche durch geringe Niederschlagsmengen geprägt sind. Dies gilt in gleicher Weise für die Bodenfeuchte, welche stark von den lokalen Verhältnissen abhängig ist. Die Böden tragen zu einer unterschiedlich guten Wasserspeicherfähigkeit des Einzugsgebietes bei, welche einen großen Einfluss auf die Abflusskomponentenbildung und -aufteilung besitzt. Eine geringfügige Variation der Einteilungsparameter scheint aus diesen Gründen angemessen zu sein. Dies könnte in Kombination mit einer höheren Anzahl von Ereignissen zu repräsentativeren BFI Kurven und einer genaueren Abtrennung der Abflusskomponenten führen.

Des Weiteren erscheint es kontrovers, dass die Einheitsganglinien mit den variierenden Blocklängen der BFI Kurven kombiniert werden, um die Abflusskomponenten aufzutrennen. Dies wird dadurch bedingt, dass die Einheitsganglinien für die Dauer eines Ereignisses berechnet wurden, wodurch keine Verbindung zu den ausgewählten Blocklängen der UKIH Methode besteht. Jedoch wird das zeitliche Auftreten und die Verhältnisse zwischen den einzelnen Abflusskomponenten plausibel wiedergegeben. Die einzelnen Werte werden dabei oftmals über- oder unterschätzt. Kurze Ereignisse werden durch kleine Blocklängen charakterisiert. Dies führt zu hohen Basisabflusswerten, da bei einer kurzen Ereignisdauer nur wenig Zwischenabfluss entstehen kann. Die Abflussdifferenz zum Gesamtabfluss wird deswegen durch den schnellen Horton'schen Oberflächenabfluss ausgeglichen. Die kurzen Blocklängen symbolisieren dadurch kurze Starkniederschläge, welche durch einen geringen Zwischenabfluss und einen hohen Anteil an Basis- und Oberflächenabfluss dominiert sind. Lange Ereignisse sind durch hohe Blocklängen geprägt. Dies bedingt niedrigere Basisabflusswerte, da der BFI mit einer steigenden Blocklänge kontinuierlich absinkt. Der Horton'sche Oberflächenabfluss kann nur für die kürzeren Blocklängen auftreten, da dieser eine kurze Auftrittsdauer besitzt und bei den meisten Ereignissen nach wenigen Stunden nicht mehr vorhanden ist. Dies führt dazu, dass der Zwischenabfluss ansteigt, welcher länger in der Entstehung benötigt als der Oberflächenabfluss. Dies führt dazu, dass die großen Blocklängen langandauernde Niederschlagsereignisse über mehrere Tage repräsentieren, welche viel Zwischenabfluss, mittlere bis geringe Basisabflusswerte und einen geringen Anteil an Oberflächenabfluss besitzen.

6.5 Vergleich der Ergebnisse mit RoGeR

Der Vergleich der Abflusskomponentenaufteilung aus den BFI Kurven und den Modellierungsergebnissen von RoGeR wird in den nachfolgenden Absätzen beschrieben und kritisch beleuchtet. Die Szenarien 1 und 2 werden in die Diskussion ebenfalls eingebunden, wobei die Graphiken der Ergebnisse im Anhang II und III abgebildet sind.

Von den drei Abflusskomponenten wird der Basisabfluss mit der höchsten Übereinstimmung zu der Modellierung von RoGeR berechnet. Dies trifft auf alle Szenarien zu und wird dadurch bedingt, dass der Basisabfluss mit der international anerkannten UKIH Methode bestimmt wird. Die Unterschätzung des Basisabfluss rührt daher, dass die Ereignisse verhältnismäßig lange andauern, wodurch viele hohe Blockgrößen mit geringen Basisabflusswerten in die Mittelwertbildung für den Vergleich mit RoGeR einbezogen werden. Dies könnte durch eine kürzere Ereignisseparationsmethode deutlich verbessert werden.

Der Basisabfluss zeigt keine klaren räumlichen Muster. Es fällt lediglich auf, dass der Basisabfluss im Hochschwarzwald und Südwesten von Baden-Württemberg für die meisten Szenarien etwas besser mit den Ergebnissen von RoGeR übereinstimmt. Auffälliger gestalten sich jedoch die Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien. Vor allem die Szenarien mit einer kurzen Niederschlagsdauer von einer Stunde liefern deutlich übereinstimmendere Ergebnisse mit der Modellierung von RoGeR als für die Szenarien mit einer großen Niederschlagsmenge und -dauer. Das Szenario 2 liefert die mit Abstand größte Übereinstimmung, da mehrere Untersuchungsgebiete der Klasse 1 angehören. Da die Szenarien 1 und 2 insgesamt ähnlicher mit der Modellierung von RoGeR sind, deutet dies darauf hin, dass die Niederschlagsmenge eine wichtige Rolle für den Basisabflussanteil eines Untersuchungsgebiet besitzt. Dies könnte dadurch begründet werden, dass bei sehr kurzen Starkniederschlägen die Infiltrationsleistung der Böden nicht ausreicht das Regenwasser aufzunehmen, wodurch große Mengen an Oberflächenabfluss auftreten. Dies bedingt einen geringen Anteil an Basisabfluss, welcher besser mit den niedrigen Werten aus der BFI Kurvenanalyse übereinstimmen. Dies ist für die Szenarien 3 und 4 mit einer längeren Niederschlagsdauer nicht so ausgeprägt.

Der Oberflächenabfluss besitzt meist die geringste absolute Abweichung zwischen der BFI Kurvenanalyse und der Modellierung mit RoGeR. Dies wird dadurch verursacht, dass der Oberflächenabfluss insgesamt die niedrigsten Abflusswerte aufweist. Die Anteile aus der Analyse der BFI Kurven liegen für die einzelnen Untersuchungsgebiete meist zwischen 2% und 6%, während der Anteil von RoGeR im Durchschnitt 5% bis 15% beträgt. Dies führt trotz geringer absoluter Abweichungen zu großen prozentualen Abweichungen. Des Weiteren ist zu beachten, dass der

Oberflächenabfluss nur in wenigen Fällen auf mehr als 5% ansteigt. Dies ist dadurch bedingt, dass die Ereignisse verhältnismäßig lange andauern, wodurch die maximalen Blocklängen für die Analyse ebenfalls groß werden. Der Oberflächenabfluss tritt jedoch nur in den ersten Stunden eines Ereignisses bzw. den kurzen Blocklängen auf, wodurch der Anteil bei einer Mittelung über eine große maximale Blocklänge gering ausfällt.

Der Horton'sche Oberflächenabfluss zeigt ein klar erkennbares räumliches Muster. Die Untersuchungsgebiete auf der Schwäbischen Alp und im Südosten von Baden-Württemberg besitzen eine größere Übereinstimmung als die Einzugsgebiete im Hochschwarzwald. Dies kann durch die kalkhaltigen Böden und Gesteine dieser Untersuchungsgebiete erklärt werden, welche eine hohe Infiltrationsleistung und Tiefenperkolation besitzen. Dadurch kann es kaum zur Entstehung von Oberflächenabfluss kommen und die Ergebnisse stimmen stärker mit den geringen Abflusswerten aus der Analyse der BFI Kurven überein. Für die Untersuchungsgebiete im Hochschwarzwald ist die Begründung nicht so offensichtlich. Die dortigen Braunerden besitzen normalerweise eine hohe Infiltrationsleistung. Diese kann jedoch durch die vorherrschende Podsolierung vieler Böden herabgesetzt sein. Des Weiteren lassen die steilen Hänge in vielen Untersuchungsgebieten den Böden nicht viel Zeit für die Infiltration des Wassers, wodurch der Oberflächenabfluss begünstigt wird. Die dominierenden Faktoren können je nach Untersuchungsgebiet variieren. Außerdem gibt es zwischen den einzelnen Szenarien große Unterschiede. Die Szenarien 3 und 4, welche durch hohe Niederschlagsmengen und eine lange Dauer gekennzeichnet sind, stimmen im Vergleich mit der Modellierung von RoGeR meist stärker überein. Dies kann möglicherweise durch eine Hydrophobizität der Böden bei trockenen Bedingungen und einer Aufsättigung der Böden bei feuchten Bedingungen erklärt werden. Dies führt dazu, dass die Böden vor allem bei den Starkniederschlägen mit einer kurzen Dauer von einer Stunde nicht in der Lage sind die großen Wassermengen aufzunehmen und viel Oberflächenabfluss entsteht. Dies führt zu den großen prozentualen Abweichungen im Vergleich zu den geringen Abflussanteilen aus der BFI Kurvenanalyse.

Für den Zwischenabfluss fällt auf, dass dieser für fast alle Untersuchungsgebiete und Szenarien deutlich überschätzt wird. Die prozentualen Abweichungen liegen dabei meist zwischen 100% und fast 3000%. Solch große Differenzen können nicht durch Messfehler, Probleme bei der Ereignisseparation und Ermittlung der Einheitsganglinien oder Unterschiede zwischen den abgeleiteten Szenarien erklärt werden. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die in dieser Arbeit angewendeten Methoden nicht in der Lage sind die Komplexität der Abflusskomponententrennung korrekt zu erfassen. Aus den zuvor beschriebenen Diskussionspunkten könnten einige Verbesserungen der Ergebnisse erreicht werden, jedoch dürfte die Analyse weiterhin durch eine Über- oder Unterschätzung der Abflusskomponenten geprägt sein.

Der Zwischenabfluss wird räumlich am besten im Hochschwarzwald im Südwesten von Baden-Württemberg berechnet. Dies zeigen beispielhaft die Einzugsgebiete der Brugga und der Neumagen,

welche vor allem bei hohen Vorfeuchtebedingungen eine gute Übereinstimmung mit den Modellierungsergebnissen von RoGeR zeigen. Dies wird durch die metamorphen Gesteine oder Granitvorkommen, welche eine geringe Durchlässigkeit besitzen, sowie durch die steilen Hänge, welche eine wichtige Voraussetzung für den Zwischenabfluss darstellen, bedingt. Die größten Abweichungen treten auf der Schwäbischen Alp oder den Keuper-Lias Gäuplatten auf. Diese Gebiete wie zum Beispiel die Lindach sind durch kalkhaltige Gesteine geprägt, welche eine hohe Tiefeninfiltration erlauben und somit dem Zwischenabfluss entgegenwirken. Außerdem fällt auf, dass der Zwischenabfluss unter den hohen Vorfeuchtebedingungen stärker mit der Modellierung mit RoGeR übereinstimmt. Für die trockenen Szenarien gehören fast alle Untersuchungsgebiete der Klasse 4 an. In den feuchten Szenarien ist dies für viele Gebiete weiterhin der Fall, jedoch lassen sich mehrere Untersuchungsgebiete der Klasse 1 oder 2 zuordnen. Dies wird durch die bessere Konnektivität der Makroporen und höhere Fließtiefe bedingt.

Zusammenfassend muss jedoch kritisch betrachtet werden, dass die berechneten Abflusskomponenten, welche aus der Kombination der BFI Kurven mit den Einheitsganglinien ermittelt wurden, sehr deutlich von den Modellierungsergebnissen von RoGeR abweichen. Dies ist unter anderem der verwendeten Methodik geschuldet, welche nicht in der Lage ist die realen Abflussbedingungen mit einer ausreichend hohen Genauigkeit zu ermitteln. Es ist dadurch nur eingeschränkt möglich die Stärken und Schwächen von RoGeR zu charakterisieren, wodurch lediglich Tendenzen ermittelt werden können. Aus diesen Gründen ist es ebenfalls nicht möglich Verbesserungsvorschläge abzuleiten, welche die Modellierung von RoGeR modifizieren könnten.

Auch die Modellierungsgenauigkeit von RoGeR sollte in der Diskussion der Ergebnisse nicht vernachlässigt werden. RoGeR stellt ein nicht kalibriertes Niederschlags-Abfluss Modell dar, wodurch alle Berechnungen des Modells über den Niederschlag aus Stations- und Radardaten, sowie Gebietsparametern abgeleitet werden. Die Berechnungen von RoGeR basieren auf vielen verschiedenen Annahmen, Parametern und vorausgegangen Modellierungen, wodurch sich Fehler fortpflanzen und vergrößern können. Außerdem werden einige wichtige hydrologische Prozesse wie die Hydrophobizität nicht ausreichend in der Modellierung abgebildet. Dies kann dazu führen, dass RoGeR den Zwischenabfluss eines Untersuchungsgebietes unterschätzt, während die Berechnung aus den BFI Kurven den Zwischenabfluss deutlich überschätzt. Dies führt zu einer großen prozentualen Abweichung der Ergebnisse aus den BFI Kurvenanalyse und der Modellierung von RoGeR, jedoch ist die prozentuale Abweichung für den Zwischenabfluss und den realen Wert etwas kleiner. Es kann jedoch auch der gegenteilige Fall eintreten, wodurch sowohl RoGeR als auch die Analyse aus den BFI Kurven den realen Zwischenabfluss überschätzen. Dadurch fällt die prozentuale Abweichung aus der BFI Kurvenanalyse und dem wahren Zwischenabfluss noch größer aus. Dies gilt in gleicher Weise für den Oberflächen- und Basisabfluss. Dieses Dilemma lässt sich lediglich durch Felduntersuchungen und -messungen auflösen, welche jedoch kosten- und zeitintensiv sind.

7. Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Arbeit haben deutlich gezeigt, dass die verwendeten Methoden zur Auftrennung der Abflusskomponenten nicht in der Lage sind die Modellierungsergebnisse von RoGeR korrekt wiederzugeben. Dies führt dazu, dass die aufgestellten Hypothesen dieser Arbeit nur unzureichend beantwortet werden können. Dennoch soll die wichtige Rolle der räumlichen Lage, Morphologie, Pedologie, Geologie und Landnutzung eines Einzugsgebietes herausgestellt werden. Dies gilt in gleicher Weise für die Anfangsbedingungen vor einem Niederschlags-Abfluss Ereignisses. Diese beiden Merkmale haben trotz aller Probleme zu großen räumlichen Unterschieden und Variationen zwischen den einzelnen Szenarien geführt.

Zusammenfassend soll erwähnt werden, dass der Basisabfluss, welcher mit der UKIH Methode berechnet wurde, flächendeckend und bei allen Szenarien die besten Ergebnisse im Vergleich zu RoGeR erzielt. Der Horton'sche Oberflächenabfluss liefert in den flachen Untersuchungsgebieten in Baden-Württemberg die größte Übereinstimmung. Diese beiden Abflusskomponenten werden fast durchgehend unterschätzt. Der Zwischenabfluss besitzt in den bergigen Einzugsgebieten und während den feuchten Anfangsbedingungen die beste Übereinstimmung mit RoGeR, jedoch wird der Zwischenabfluss in fast allen Untersuchungsgebieten und Szenarien deutlich überschätzt. Insgesamt kann gesagt werden, dass die Einzugsgebiete des Hochschwarzwaldes mit der besten Übereinstimmung bei allen fast allen Abflusskomponenten und Szenarien berechnet werden. Die Untersuchungsgebiete auf der Schwäbischen Alp, welche durch Kalk und Karst geprägt sind, liefern meist die größten Abweichungen bei dieser Analyse.

Die Abweichungen der Abflusskomponenten mit RoGeR sind dabei so groß, dass diese nicht durch die Datengrundlage oder Messfehler erklärt werden können, wodurch die verwendete Methodik kritisch hinterfragt werden muss. Vor allem die Berechnung der Einheitsganglinien stellt aufgrund ihrer fehlenden Variabilität und Dynamik eine große Fehlerquelle dar. Die Berechnung der Einheitsganglinien, welche auf konstanten Variablen wie der Landnutzung und dem Gefälle basieren, spiegeln die Realität nur eingeschränkt wider. Ein weiteres großes Problem besteht in der Anwendung der statischen Einheitsganglinie auf die verschiedenen Szenarien. Dies führt trotz eines variablen Basisabflusses zu dem gleichen zeitlichen Auftreten des Oberflächen- und Zwischenabflusses und spiegelt in keiner Weise die unterschiedlichen Anfangsbedingungen der Ereignisse wider.

Außerdem stellt die Anwendung der Einheitsganglinien für die verschiedenen Blockgrößen eine unkonventionelle Methodik dar, da diese für die Anwendung von Niederschlags-Abfluss Ereignisse entwickelt wurde, jedoch auf die unterschiedliche Blockgrößen der BFI Kurven angewendet wird. Dieser Schritt erscheint dennoch plausibel, da kurze Blockgrößen eine schnelle Reaktion des Einzugsgebietes charakterisieren und die ersten Stunden der Einheitsganglinien durch den schnellen Oberflächenabfluss geprägt sind. Bei größeren Blockgrößen verlangsamt sich die Reaktion des Einzugsgebietes. Dies wird durch den größeren Anteil an Zwischenabfluss repräsentiert. Dabei zeigen die Ergebnisse, dass die Tendenzen der Berechnungen korrekt sind, jedoch die absoluten Werte stark voneinander abweichen.

Diese Punkte verdeutlichen, dass die verwendeten Methodiken einige Schwächen besitzen, jedoch beinhalten diese auch ein hohes Potenzial für die Aufteilung der Abflusskomponenten in verschiedenen Einzugsgebieten. Dabei könnte vor allem die Berechnung des Basisabflusses verbessert werden, indem für jedes Einzugsgebiet eine individuelle Blocklänge bestimmt wird, welche die realen Verhältnisse am besten wiedergeben kann. Diese könnten außerdem spezifisch für verschiedene Niederschlagsintensitäten, -dauern oder Vorfeuchtebedingungen angepasst werden. Dies gilt in gleicher Weise auch für die Einheitsganglinien, welche für unterschiedliche Anfangsbedingungen kalkuliert werden könnten. Zusätzlich dazu könnten die Ergebnisse durch Felduntersuchungen und Tracer- oder Isotopenmethoden weiter verbessert oder evaluiert werden. Dadurch wäre es möglich, dass für jedes auftretende Ereignis eine individuelle Aufteilung der Abflusskomponenten berechnet wird. Dies kann vor allem für die Hochwasservorhersage eine deutliche Verbesserung darstellen.

Des Weiteren sollten zukünftig Radardaten des Niederschlages für die Analyse und Aufteilung der Abflusskomponenten genutzt werden. Diese können die räumliche Niederschlagsverteilung und -menge genauer als die Daten von punktuellen Messstationen abbilden. Außerdem könnte eine höhere zeitliche Auflösung der Daten für die Analyse genutzt werden. Für viele Abflusspegel und einige Niederschlagsstationen liegen die Messdaten in 15-minütiger Auflösung vor. Dadurch könnte vor allem die zeitliche Charakterisierung der Niederschläge deutlich verbessern werden. In Kombination mit einer modifizierten Ereignisseparation könnte dies zu einer stark verbesserten Datengrundlage für die nachfolgenden Analysen führen.

Außerdem wäre es interessant die BFI Kurven nicht nur mit den Einheitsganglinien zu kombinieren, sondern das Abflussgeschehen durch "Breakpoints" einzuteilen. Diese stehen repräsentativ für die unterschiedlichen Speichersysteme und Abflusskomponenten eines Einzugsgebietes. Diese Methode könnte genutzt werden, um das volle Potential der BFI Kurvenmethode zu entfalten und deutlich genauere Ergebnisse im Vergleich zu der Modellierung mit RoGeR zu erhalten.

Abschließend soll erwähnt werden, dass die BFI Kurvenanalyse von Stölzle et al. (unveröffentlicht) ein hohes Potential besitzt, aber aufgrund der Datenausganglage, Ereignisseparation und den weiteren gewählten Methoden einige Fragen offenbleiben. Es wäre deshalb wünschenswert all diese Punkte in einer nachfolgenden Arbeit zu analysieren.

Literaturverzeichnis

Aksoy, H.; Unal, N. E.; Pektas, A. O. (2008): Smoothed minima baseflow separation tool for perennial and intermittent streams, Hydrological Processes, 22, 22, 4467–4476.

Amelung, W.; Blume, H.-P.; Fleige, H.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I.; Kretzschmar, R.; Stahr, K.; Wilke, B.-M. (2018): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde, Springer Berlin Heidelberg, Berlin & Heidelberg, Aufl. 17.

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, 11, 1043–1058.

Bachmair, S.; Weiler, M. (2012): Hillslope characteristics as controls of subsurface flow variability, Hydrology and Earth System Sciences, 16, 10, 3699–3715.

Berghuijs, W. R.; Hartmann, A.; Woods, R. A. (2016): Streamflow sensitivity to water storage changes across Europe, Geophysical Research Letters, 43, 5, 1980–1987.

Berghuijs, W. R.; Woods, R. A.; Hutton, C. J.; Sivapalan, M. (2016): Dominant flood generating mechanisms across the United States, Geophysical Research Letters, 43, 9, 4382–4390.

Blöschl, G.; Hall, J.; Parajka, J.; Perdigão, R. A. P.; Merz, B.; Arheimer, B.; Aronica, G. T.; Bilibashi,
A.; Bonacci, O.; Borga, M.; Čanjevac, I.; Castellarin, A.; Chirico, G. B.; Claps, P.; Fiala, K.; Frolova,
N.; Gorbachova, L.; Gül, A.; Hannaford, J.; Harrigan, S.; Kireeva, M.; Kiss, A.; Kjeldsen, T. R.;
Kohnová, S.; Koskela, J. J.; Ledvinka, O.; Macdonald, N.; Mavrova-Guirguinova, M.; Mediero, L.;
Merz, R.; Molnar, P.; Montanari, A.; Murphy, C.; Osuch, M.; Ovcharuk, V.; Radevski, I.; Rogger, M.;
Salinas, J. L.; Sauquet, E.; Šraj, M.; Szolgay, J.; Viglione, A.; Volpi, E.; Wilson, D.; Zaimi, K.; Živković,
N. (2017): Changing climate shifts timing of European floods, Science, New York, 357, 6351, 588–590.

Blume, T.; Zehe, E.; Bronstert, A. (2007): Rainfall - runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation, Hydrological Sciences Journal, 52, 5, 843–862.

Capell, R.; Tetzlaff, D.; Hartley, A. J.; Soulsby, C. (2012): Linking metrics of hydrological function and transit times to landscape controls in a heterogeneous mesoscale catchment, Hydrological Processes, 26, 3, 405–420.

Chapman, T. (1999): A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation, Hydrological Processes, 13, 5, 701–714.

Dumanski, S.; Pomeroy, J. W.; Westbrook, C. J. (2015): Hydrological regime changes in a Canadian Prairie basin, Hydrological Processes, 29, 18, 3893–3904.

Dyck, S.; Peschke, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie, Verlag für Bauwesen, Berlin, Aufl. 3.

Faeh, A. O.; Scherrer, S.; Naef, F. (1997): A combined field and numerical approach to investigate flow processes in natural macroporous soils under extreme precipitation, Hydrology and Earth System Sciences, 1, 4, 787–800.

Fang, X.; Cleveland, T.; Garcia, C. A.; Thompson, D.; Malla, R. (2005): Literature Review on Timing Parameters for Hydrographs, Department of Civil Engineering, Lamar University.

Gaál, L.; Szolgay, J.; Kohnová, S.; Parajka, J.; Merz, R.; Viglione, A.; Blöschl, G. (2012): Flood timescales: Understanding the interplay of climate and catchment processes through comparative hydrology, Water Resources Research, 48, 4, 383–404.

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, 3-4, 148–162.

Gudera, T.; Morhard, A. (2015): Hoch aufgelöste Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung mit GWN-BW, Hydrologie und Wasserwirtschaft, 59, 5, 205–216.

Hoeg, S.; Uhlenbrook, S.; Leibundgut, C (2000): Hydrograph separation in a mountainous catchment combining hydrochemical and isotopic tracers, Hydrological Processes, 14, 7, 1199–1216.

James, A. L.; Roulet, N. T. (2007): Investigating hydrologic connectivity and its association with threshold change in runoff response in a temperate forested watershed, Hydrological Processes, 21, 25, 3391–3408.

Klaffl, S. (2011): Kombinierte Wahrscheinlichkeiten (joint probabilities) von Starkniederschlägen und Vorfeuchtebedingungen in Baden – Württemberg, Diplomarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Klose, B. (2008): Meteorologie, Springer Berlin Heidelberg, Berlin & Heidelberg, Aufl. 1.

Koskelo, A. I.; Fisher, T. R.; Utz, R. M.; Jordan, T. E. (2012): A new precipitation-based method of baseflow separation and event identification for small watersheds (<50km²), Journal of Hydrology, 450-451, 267–278.

Kumar, R.; Samaniego, L.; Attinger, S. (2013): Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations, Water Resources Research, 49, 1, 360–379.

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2016): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umwelt Messungen und Naturschutz, Karlsruhe.

Loritz, R. (2014): Vergleich der Abflussbildung in Baden-Württemberg in Abhängigkeit von Vorfeuchte und Niederschlagsintensität, Masterarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Malitz, G.; Ertel, H. (2015): KOSTRA-DWD-2010, Deutscher Wetterdienst, Hydrometeorologie.

Markart, G.; Kohl, B.; Sotier, B.; Schauer, T.; Bunza, G.; Stern, R. (2006): Geländeableitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes bei Starkregen, Wiener Mitteilungen, 197, 159–178.

McGlynn, B. L.; McDonnell, J. J.; Seibert, J.; Kendall, C. (2004): Scale effects on headwater catchment runoff timing, flow sources, and groundwater-streamflow relations, Water Resources Research, 40, 7, 99–113.

Mei, Y.; Anagnostou, E. N. (2015): A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records, Journal of Hydrology, 523, 636–649.

Merz, R. (2006): Regionalisierung von Ereignisgrößen, Wiener Mitteilungen, 197, 179-194.

Merz, R.; Blöschl, G. (2003): A process typology of regional floods, Water Resources Research, 39, 12, 1065–1085.

Merz, R.; Blöschl, G. (2008): Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information, Water Resources Research, 44, 8, 3–20.

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, 1, 1–19.

Merz, R.; Blöschl, G. (2009): Process controls on the statistical flood moments - a data based analysis, Hydrological Processes, 23, 5, 675–696.

Merz, R.; Blöschl, G.; Parajka, J. (2006): Spatio-temporal variability of event runoff coefficients, Journal of Hydrology, 331, 3-4, 591–604.

Merz, R.; Parajka, J.; Blöschl, G. (2009): Scale effects in conceptual hydrological modeling, Water Resources Research, 45, 9, 17–32.

Mitchell, J. K. (2003): European River Floods in a Changing World, Risk Analysis, 23, 3, 567–574.

Parajka, J.; Blöschl, G.; Merz, R. (2007): Regional calibration of catchment models: Potential for ungauged catchments, Water Resources Research, 43, 6, 937–953.

Patil, S.; Stieglitz, M. (2011): Hydrologic similarity among catchments under variable flow conditions, Hydrology and Earth System Sciences, 15, 3, 989–997.

Piggott, A. R.; Moin, S.; Southam, C. (2005): A revised approach to the UKIH method for the calculation of baseflow / Une approche améliorée de la méthode de l'UKIH pour le calcul de l'écoulement de base, Hydrological Sciences Journal, 50, 5, 411–421.

Ruiz-Villanueva, V.; Borga, M.; Zoccatelli, D.; Marchi, L.; Gaume, E.; Ehret, U. (2012): Extreme flood response to short-duration convective rainfall in South-West Germany, Hydrology and Earth System Sciences, 16, 5, 1543–1559.

Scherrer, S. (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen, Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht.

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

Sivapalan, M.; Blöschl, G.; Merz, R.; Gutknecht, D. (2005): Linking flood frequency to long-term water balance: Incorporating effects of seasonality, Water Resources Research, 41, 6, 1065–1082.

Steinbrich, A.; Leistert, H.; Weiler, M. (2014): Modellierung und Gefährdungspotenzial von wild abfließendem Wasser, Abschlussbericht für die LUBW, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Steinbrich, A.; Leistert, H.; Weiler, M. (2015): Alles RoGeR? Modellierung von Sturzfluten aufgrund von Starkniederschlägen, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Aufl. 35.

Steinbrich, A.; Leistert, H.; Weiler, M. (2016): Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution, Environmental Earth Sciences, 75, 21, 165–181.

Steinbrich, A.; Stöltzle, M.; Weiler, M. (2016): Generierung von konsistenten Grundlagendaten zur Berechnung von Starkregenereignissen für eine Starkregengefahrenkartierung in BW, Abschlussbericht für die LUBW, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Stölzle, M.; Schütz, T.; Weiler, M.; Stahl, K.; Tallaksen, L. M. (unveröffentlicht): Beyond binary baseflow separation: delayed flow index as a fresh perspective on streamflow contributions, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Tallaksen, L. M. (1995): A review of baseflow recession analysis, Journal of Hydrology, 165, 1-4, 349–370.

Tarasova, L.; Basso, S.; Zink, M.; Merz, R. (2018): Exploring controls on rainfall-runoff events: 1. Time-series-based event separation and temporal dynamics of event runoff response in Germany, Water Resources Research, 54, 10, 7711-7732.

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, 1, 157–170.

Tramblay, Y.; Bouvier, C.; Martin, C.; Didon-Lescot, J.-F.; Todorovik, D.; Domergue, J.-M. (2010): Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall–runoff modelling, Journal of Hydrology, 387, 3-4, 176–187.

van den Besselaar, E. J. M.; Klein Tank, A. M. G.; Buishand, T. A. (2012): Trends in European precipitation extremes over 1951-2010, International Journal of Climatology, 111, 2682–2689.

Wagener, T.; Montanari, A. (2011): Convergence of approaches toward reducing uncertainty in predictions in ungauged basins, Water Resources Research, 47, 6, 230–238.

Wagener, T.; Sivapalan, M.; Troch, P.; Woods, R. (2007): Catchment Classification and Hydrologic Similarity, Geography Compass, 1, 4, 901–931.

Wessolek, G.; Kaupenjohann, M.; Renger, M. (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis, Bodenökologie und Bodengenese, Universität Berlin, 40.

Wiekenkamp, I.; Huisman, J. A.; Bogena, H. R.; Lin, H. S.; Vereecken, H. (2016): Spatial and temporal occurrence of preferential flow in a forested headwater catchment, Journal of Hydrology, 534, 139–149.

World Meteorological Organisation (2008): Manual on low-flow estimation and prediction, World Meteorological Organization, Geneva, 50.

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, 8, 1756–1774.

Zehe, E.; Becker, R.; Bárdossy, 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, 1-4, 183–202.

Zehe, E.; Elsenbeer, H.; Lindenmaier, F.; Schulz, K.; Blöschl, G. (2007): Patterns of predictability in hydrological threshold systems, Water Resources Research, 43, 7, 255–267.

Zhu, L.; Fan, D.; Ma, R.; Zhang, Y.; Zha, Y. (2018): Experimental and Numerical Investigations of Influence on Overland Flow and Water Infiltration by Fracture Networks in Soil, Geofluids, 2018, 4, 1–16.

Weitere Literatur

Grachtrup, B. (2016): Braunsbach ist nicht wiederzuerkennen, Die Welt, Axel-Springer Verlag, Berlin, https://www.welt.de/vermischtes/article155805937/Braunsbach-ist-nicht-wiederzuerkennen.html (zuletzt geöffnet am 06.03 2019).

Gennies, S.; Funk, A.; Schlegel, M.; Dehmer, D. (2013): Wie schlimm war die Flut wirklich?, Der Tagesspiegel, Der Tagesspiegel GmbH, Berlin, https://www.tagesspiegel.de/politik/hochwasser-bilanz-2013-wie-schlimm-war-die-flut-wirklich/8416770.html (zuletzt geöffnet am 06.03 2019).

82

Anhang I – Gebietsbeschreibungen

1. Altschweier – Bühlot

Das Einzugsgebiet der Bühlot liegt im nördlichen Schwarzwald und im Westen von Baden-Württemberg. Die Fläche beträgt 30,196 km². Der Vorfluter fließt in nordwestliche Richtung und mündet letztendlich in den Rhein. Im Einzugsgebiet befinden sich keine Seen oder Hochwasserrückhaltebecken, welche das Abflussgeschehen beeinflussen könnten.

Die Geologie ist durch Buntsandstein und granitische Vorkommen geprägt. Dies resultiert in der Braunerde als dominierende Bodenart, welche teilweise oder vollständig podsoliert sein können. Auch Parabraunerden oder vereinzelte Lössvorkommen können im Untersuchungsgebiet auftreten.



A-Karte 1: Landnutzung des Einzugsgebietes der Bühlot.

Die Landnutzung (A-Karte 1) ist in den Hangbereichen des Einzugsgebietes durch Nadel- und Mischwälder geprägt. In den Tälern befinden sich die Siedlungsgebiete und Grünlandflächen. Vereinzelt mischen sich auch Weinbau oder Obstbeständen zu der Landnutzung hinzu.

2. Bad Teinach – Teinach

Das Einzugsgebiet der Teinach liegt im westlichen Teil von Baden-Württemberg und gehört zu den Randplatten des Schwarzwaldes. Das Einzugsgebiet besitzt eine Fläche von 51,914 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Osten, wodurch die Teinach nachfolgend in den Neckar mündet. Es treten keine Seen oder Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet auf.

Die Geologie wird ausschließlich durch Buntsandstein dominiert. Daraus resultieren Braunerden, welche teilweise oder vollständig podsoliert sind. Vereinzelt kann es zum Auftreten von Stauwasserböden wie den Stagnogleyen kommen.



A-Karte 2: Landnutzung des Einzugsgebietes der Teinach.

Die Landnutzung (A-Karte 2) ist zum größten Teil durch Nadelwälder geprägt. Siedlungsgebiete treten lediglich auf den Hochflächen oder Tälern auf. Grünlandflächen finden sich vereinzelt im westlichen oder südlichen Teil des Untersuchungsgebietes. Außerdem gibt es größere Flächen von komplexen Parzellenstrukturen.

3. Eyachmühle – Eyach

Das Untersuchungsgebiet der Eyach befindet sich im nördlichen Schwarzwald und im Westen von Baden-Württemberg. Es besitzt eine Fläche von 30,251 km². Die Hauptfließrichtung des Vorfluters zeigt nach Nordosten, wodurch die Eyach in den Neckar mündet. Es gibt keine Seeflächen oder Hochwasserrückhaltebecken im Untersuchungsgebiet.

Die Geologie wird durch Buntsandstein dominiert. Punktuell können holozänen Aufschüttungen von Auengewässern auftreten. Die Böden sind durch Braunerden und Podsole geprägt. Vor allem an den Rändern des Einzugsgebietes kann Stauwasser auftreten, welches in dem Vorkommen von Stagnogleyen resultiert.



A-Karte 3: Landnutzung des Einzugsgebietes der Eyach.

Die Landnutzung des Einzugsgebietes der Eyach ist in A-Karte 3 abgebildet und besteht ausschließlich aus wechselnden Nadel- und Mischwäldern.

4. Friesenheim – Friesenheimer Dorfbach

Das Einzugsgebiet des Friesenheimer Dorfbachs liegt im westlichen Baden-Württemberg. Das Gebiet befindet sich im Schwarzwald und weist eine Fläche von 16,964 km² auf. Die Fließrichtung zeigt nach Westen, wodurch der Friesenheimer Dorfbach zum Haupteinzugsgebiet des Rheins gehört. Es gibt keine Vorkommen von Seen oder Hochwasserrückhaltebecken, welche das Abflussverhalten beeinflussen könnten.

Die Geologie ist durch das Vorkommen von Buntsandstein in den bergigen Bereichen und tertiären Sedimentgesteinen in den Tälern dominiert. Die Böden bestehen aus Braunerden und Parabraunerden. Auf den Lössböden des Einzugsgebietes können zudem Pararendzinen entstehen. Die Böden sind nicht durch Stau- oder Grundwasser beeinflusst.



A-Karte 4: Landnutzung des Einzugsgebietes des Friesenheimer Dorfbachs.

Die Landnutzung (A-Karte 4) ist in den Hangbereichen durch Nadel- und Mischwälder geprägt. In den flachen Gebieten treten Siedlungen und komplexe Parzellenstrukturen auf. Vereinzelt kommt es zur landwirtschaftlichen Nutzung als Ackerfläche oder durch Weinanbau.

5. Goppertshofen - Rottum

Das Einzugsgebiet der Rottum liegt im Südosten von Baden-Württemberg und besitzt eine Fläche 57,842 km². Das Gebiet gehört zur landschaftlichen Einheit der Donau-Iller-Lech Platte. Die Hauptfließrichtung der Rottum zeigt nach Norden, wodurch diese in die Donau mündet. Im Untersuchungsgebiet sind keine Hochwasserrückhaltebecken vorhanden, jedoch treten fünf kleinere Seen auf, welche eine Gesamtfläche von 0,075 km² besitzen.

Die Geologie ist geprägt durch Sedimentgesteine, sowie Altmoränen und Terrassen, welche sich in einem tertiären Hügelland äußern. Die Böden bestehen zu einem großen Teil aus Parabraunerden oder Pseudogleyen, welche auf den großflächigen Stauwasserbereichen im Süden des Einzugsgebietes auftreten können. In der Nähe von Flüssen können auch Auenlehme vorhanden sein.



A-Karte 5: Landnutzung des Einzugsgebietes der Rottum.

Die Landnutzung (A-Karte 5) wird zu einem großen Teil von Grünlandflächen dominiert. An nächster Stelle treten Nadelwälder und komplexe Parzellenstrukturen auf. Vor allem im Norden befinden sich zusätzlich Siedlungsgebiete und vereinzelte Ackerflächen.

6. Gruol – Stunzach

Das Einzugsgebiet der Stunzach liegt im Vorland der Schwäbischen Alb in der Mitte von Baden-Württemberg. Das Gebiet besitzt eine Fläche von 76,083 km². Die Hauptfließrichtung zeigt in nordöstliche Richtung, wodurch die Stunzach in den Neckar mündet. Es gibt keine Seeflächen oder Hochwasserrückhaltebecken im Untersuchungsgebiet.

Die Geologie ist durch das großflächige Auftreten von Keuper dominiert. Des Weiteren finden sich Lias- und Doggervorkommen im südlichen Teil des Gebietes. Die Böden bestehen zum größten Teil aus Pelosolen und Braunerden, welche teilweise oder vollständig podsoliert sein können. Vereinzelt können die Böden durch Löss, Stau- oder Grundwasser beeinflusst sein.



A-Karte 6: Landnutzung des Einzugsgebietes der Stunzach.

Die Landnutzung (A-Karte 6) ist durch große Nadelwälder in der Mitte und im Westen geprägt. Im Süden und Osten treten größere Ackerflächen und komplexe Parzellenstrukturen auf. Auch die Siedlungsgebiete befinden sich in diesen Bereichen. Vereinzelt kann die Landnutzung durch Grünlandflächen geprägt sein.

7. Hirschbronn – Zulauf Ölbach

Das Einzugsgebiet am Zulauf für den Ölbach liegt im Südosten von Baden-Württemberg und ist Teil der Donau-Iller-Lech Platte. Es besitzt eine Fläche von 24,731 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Nordosten, jedoch besitzt das Einzugsgebiet eine sehr geringe Flussdichte. Der Vorfluter mündet letztendlich in die Donau. Es gibt keine Seen oder Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet.

Die Geologie ist durch Altmoränen und Terrassen geprägt, welche ein tertiäres Hügelland bilden. Die daraus resultierenden Böden sind Parabraunerden. Der größte Teil des Gebietes ist zudem durch Stauoder Grundwasser beeinflusst, wodurch auch Auen- oder Pseudogleye vorkommen können.



A-Karte 7: Landnutzung des Einzugsgebietes des Zulaufs zum Ölbach.

Die Landnutzung in A-Karte 7 ist zum größten Teil durch Grünland geprägt. Stellenweise treten komplexe Parzellenstrukturen oder Nadel- und Mischwälder auf. Siedlungsflächen oder Ackerland machen nur einen kleinen Anteil der Landnutzung aus.

8. IIImühle – Steina

Das Untersuchungsgebiet der Steina befindet sich im Hochschwarzwald im Südwesten von Baden-Württemberg. Die Fläche beträgt 49,015 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Südosten, wodurch die Steina nachfolgend in den Rhein mündet. Im Einzugsgebiet befinden sich keine Seen oder Hochwasserrückhaltebecken, welche das Abflussgeschehen beeinflussen können.

Die Geologie ist zum großen Teil durch Granit geprägt, jedoch treten auch Buntsandsteine oder Muschelkalk in Teilgebieten auf. Die Böden sind durch Braunerden dominiert, welche teilweise oder vollständig podsoliert sind. Vereinzelt können auch Pelosole oder Gleye auftreten, welche in kleinen stau- oder grundwasserbeeinflussten Gebieten liegen.



A-Karte 8: Landnutzung des Einzugsgebietes der Steina.

Die Landnutzung (A-Karte 8) ist durch Nadelwälder dominiert. In einigen kleineren Gebieten im Süden oder Westen des Einzugsgebietes kommen auch Grünlandflächen vor. Siedlungsgebiete und Ackerflächen machen lediglich einen kleinen Anteil der Landnutzung aus.
9. Kappelrodeck – Acher

Das Einzugsgebiet der Acher liegt im nördlichen Schwarzwald im Westen von Baden-Württemberg. Die Fläche beträgt 52,844 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Westen bzw. Nordwesten, wodurch die Acher in den Rhein mündet. Im Einzugsgebiet sind keine Hochwasserrückhaltebecken vorhanden, jedoch befindet sich ein See im Nordosten des Untersuchungsgebietes. Dieser besitzt eine Fläche von 0,023 km².

Die Geologie ist zum größten Teil durch Granit geprägt. An den Gebietsrändern treten stellenweise metamorphe Gesteine oder Buntsandstein zu Tage. Die Böden sind durch Braunerden dominiert, welche teilweise oder vollständig podsoliert sein können. In einigen Bereichen treten auch Parabraunerden oder Gleye auf. Letztere sind auf den wenigen durch Stau- oder Grundwasser beeinflussten Flächen zu finden. Auch eine kleine Hochmoorfläche ist im Einzugsgebiet vorhanden.



A-Karte 9: Landnutzung des Einzugsgebietes der Acher.

Die Landnutzung (A-Karte 9) ist durch große Nadel- und Mischwaldflächen dominiert. Nachfolgend sind Grünlandflächen und komplexen Parzellenstrukturen zu nennen, welche meist in der Mitte oder im Südwesten auftreten. Siedlungsflächen besitzen nur einen kleinen Anteil an der Landnutzung.

10. Kirchheim – Lindach

Das Untersuchungsgebiet der Lindach liegt auf der Schwäbischen Alp in der Mitte von Baden-Württemberg. Es besitzt eine Fläche von 96,315 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Nordosten und die Lindach gehört zum Haupteinzugsgebiet des Neckars. Es gibt keine Seeflächen oder Hochwasserrückhaltebecken im Untersuchungsgebiet.

Die Geologie wird durch Lias und Dogger dominiert. Zusätzlich befinden sich im Süden Malmvorkommen und im Nordwesten holozäne Aufschüttungen durch Auen. Punktuell treten sogar vulkanische Gesteine zu Tage. Die Böden gestalten sich sehr variabel. Dabei nehmen Braunerden den größten Anteil ein, jedoch treten auch Parabraunerden und -rendzinen großflächig auf. Auch Pelosole und Gleye, welche sich in den stauwasserbeeinflussten Bereichen befinden, spielen eine wichtige Rolle im Einzugsgebiet der Lindach.



A-Karte 10: Landnutzung des Einzugsgebietes der Lindach.

Die Landnutzung (A-Karte 10) ist ebenfalls sehr komplex. Im Süden dominieren eher Laubwälder und Grünlandflächen. Im Norden gibt es große Ackerflächen, komplexe Parzellenstrukturen und Obstanbau. Auch die Siedlungen nehmen einen großen Anteil der Landnutzung in Anspruch.

11. Königheim – Brehmbach

Das Einzugsgebiet des Brehmbachs liegt auf den Neckar-Tauber Gäuplatten im Norden von Baden-Württemberg. Das Gebiet des Brehmbachs besitzt eine Fläche von 53,894 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Osten und der Brehmbach mündet letztlich in den Main. Es gibt keine Seen oder Hochwasserrückhaltebecken innerhalb des Untersuchungsgebiets.

Die Geologie ist ausschließlich von Muschelkalk und Löss, welcher auf der gesamten Fläche des Einzugsgebiets auftritt, dominiert. Die daraus resultierenden Böden sind durch Rendzinen geprägt. Vereinzelt können auch Braunerden, Pararendzinen, Parabraunerden oder Pelosole auftreten, welche ein kleinräumiges Bodenmosaik bilden. Es gibt keine stauwasser- oder grundwasserbeeinflussten Flächen im Einzugsgebiet des Brehmbachs.



A-Karte 11: Landnutzung des Einzugsgebietes des Brehmbachs.

Die Landnutzung (A-Karte 11) wird durch Ackerflächen dominiert. Grünlandflächen und Wälder nehmen ebenfalls größere Bereiche des Einzugsgebietes ein. Siedlungen, komplexe Parzellenstrukturen oder Weinbauflächen nehmen lediglich einen kleinen Anteil der Landnutzung ein.

12. Maria Tann – Kirnach

Das Untersuchungsgebiet der Kirnach liegt im Schwarzwald im Südwesten von Baden-Württemberg und besitzt eine Fläche von 29,704 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Osten und die Kirnach ist ein Teil des Einzugsgebietes der Donau. Es gibt keine Seeflächen oder Hochwasserrückhaltebecken im Untersuchungsgebiet.

Die Geologie besteht zu einer Hälfte aus metamorphen Gesteinen und zur anderen Hälfte aus Buntsandstein. Der Boden wird von Braunerden dominiert, welche teilweise oder vollständig podsoliert sein können. Auch Gleye treten in den grundwasserbeeinflussten Bereichen der Auen oder den stauwasserdominierten Teilen des Untersuchungsgebietes auf.



A-Karte 12: Landnutzung des Einzugsgebietes der Kirnach.

Die Landnutzung in A-Karte 12 ist durch Nadelwälder an den Hängen des Gebietes geprägt, aber auch die Grünlandflächen in den Tälern nehmen einen großen Anteil der Landnutzung ein. Siedlungsgebiete treten lediglich im Osten auf und spielen eine untergeordnete Rolle.

13. Menzingen – Weiherbach

Das Einzugsgebiet des Weiherbachs liegt auf den Neckar-Tauber Gäuplatten im Nordwesten von Baden-Württemberg. Es stellt mit einer Fläche von 3,102 km² das kleinste Untersuchungsgebiet dieser Arbeit dar. Die Hauptfließrichtung zeigt nach Süden, wodurch der Weiherbach in den Rhein mündet. Es gibt keine Seevorkommen oder Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet.

Die Geologie wird durch großflächige Keuper- und Lössvorkommen geprägt. Die daraus resultierenden Böden werden als Pararendzinen oder Parabraunerden kategorisiert. Auch Pelosole oder Auenböden können kleinflächig auftreten. Eine relevante Beeinflussung durch Stau- oder Grundwasser scheint nicht gegeben zu sein.



A-Karte 13: Landnutzung des Einzugsgebietes des Weiherbachs.

Die Landnutzung in A-Karte 13 wird zum größten Teil durch Ackerflächen geprägt. Des Weiteren kommen komplexe Parzellenstrukturen und Laubwälder im Einzugsgebiet des Weiherbachs vor, jedoch nehmen diese einen geringen Anteil ein. Es befinden sich keine Siedlungsflächen im Untersuchungsgebiet.

14. Möhringen – Krähenbach

Das Einzugsgebiet des Krähenbachs befindet sich im Süden von Baden-Württemberg. Dabei liegt es im Vorland der Schwäbischen Alp, sowie den Neckar-Tauber Gäuplatten. Die Fläche beträgt 27,714 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Südosten, wodurch der Krähenbach in die Donau mündet. Es gibt eine Talsperre der Stufe 2 im Südosten des Einzugsgebiets, welche einen See von 0,04 km² aufstaut.

Die Geologie besteht im Nordwesten aus Lias und Dogger und im Südosten aus Malmvorkommen. Die Böden im nordwestlichen Teil sind durch Braunerden und Pelosole geprägt. Auch Pseudogleye können auf den Stauwasserbereichen des Untersuchungsgebietes vorkommen. Im Südosten sind die Böden durch Rendzinen und Pararendzinen dominiert.



A-Karte 14: Landnutzung des Einzugsgebietes des Krähenbachs.

Die Landnutzung (A-Karte 14) wird durch Misch- und Nadelwälder dominiert. Auch Grünlandflächen und komplexe Parzellenstrukturen nehmen einen größeren Anteil an der Landnutzung ein. Ackerflächen und Siedlungsgebiete spielen nur eine untergeordnete Rolle.

15. Neufrach – Deggenhausener Aach

Das Einzugsgebiet der Deggenhausener Aach liegt im südalpinen Hügel- und Moorland im Südosten von Baden-Württemberg. Das Gebiet besitzt eine Fläche von 74,661 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Südwesten, wodurch die Deggenhausener Aach letztendlich in den Rhein mündet. Es gibt keine Seeflächen oder Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet, welche das Abflussgeschehen beeinflussen könnten.

Die Geologie entspricht einer Jungmoränenlandschaft, welche sich auf feinkörnigen Sedimenten gebildet hat. Die daraus resultierenden Böden sind Parabraunerden, welche das Untersuchungsgebiet großflächig dominieren. Auch Pararendzinen kommen an den steileren Hangbereichen vor. In Flussnähe bilden sich zudem Auenböden, welche durch das hoch anstehende Grundwasser beeinflusst werden.



A-Karte 15: Landnutzung des Einzugsgebietes der Deggenhausener Aach.

Die Landnutzung im Untersuchungsgebiet der Deggenhausener Aach (A-Karte 15) ist komplex und hoch variabel. Dabei nehmen Misch- und Nadelwälder als auch komplexe Parzellenstrukturen, Grünlandflächen und Ackerland verteilt über das gesamte Einzugsgebiet einen großen Anteil an der Landnutzung ein. Siedlungsgebiete spielen nur eine untergeordnete Rolle.

16. Oberried – Brugga

Das Einzugsgebiet der Brugga befindet sich im Hochschwarzwald im Südwesten von Baden-Württemberg und besitzt eine Fläche von 39,909 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Norden, wobei die Brugga ein Teileinzugsgebiet des Rheins darstellt. Das Untersuchungsgebiet ist durch keine Seen oder Hochwasserrückhaltebecken beeinflusst.

Die Geologie ist vollständig durch metamorphe Gesteine dominiert. Die Böden bestehen ausschließlich aus Braunerden, welche stellenweise podsoliert sein können. An den steilen Talflanken können vereinzelt Ranker und Regosole auftreten. Es gibt keinen Stauwassereinfluss im Untersuchungsgebiet, jedoch kann das Grundwasser im südöstlichen Teil hoch anstehen und die Bodenbildung beeinflussen.



A-Karte 16: Landnutzung des Einzugsgebietes der Brugga.

Die Landnutzung (A-Karte 16) wird durch Nadel- und Mischwälder dominiert. In den Talbereichen und den Hochebenen wird die Landnutzung durch Grünlandflächen geprägt. Im Norden des Einzugsgebietes gibt es ein Siedlungsgebiet, welches jedoch einen geringen Anteil an der Landnutzung ausmacht.

17. Oberrot – Fichtenberger Rot

Das Untersuchungsgebiet der Fichtenberger Rot liegt in der schwäbischen Keuper-Lias Region im Nordosten von Baden-Württemberg. Die Fläche beträgt 62,337 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Südosten, wodurch die Fichtenberger Rot in den Neckar mündet. Es gibt keine Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet, jedoch mehrere kleine Seen. Diese besitzen in der Summe eine Fläche von 0,054 km².

Die Geologie wird vollständig durch das Vorkommen von Keuper dominiert. Die daraus resultierenden Böden sind Braunerden, welche teilweise podsoliert sein können. Auch Pelosole bilden eine häufig auftretende Bodenform. Große Teile des Untersuchungsgebietes sind durch Stau- oder Grundwasser beeinflusst, wodurch auch Gleye vorkommen können.



A-Karte 17: Landnutzung des Einzugsgebietes der Fichtenberger Rot.

Die Landnutzung (A-Karte 17) ist durch großflächige Misch- und Nadelwälder geprägt. Auch Grünlandflächen nehmen einen größeren Teil des Einzugsgebietes in Anspruch. Ackerflächen, komplexe Parzellenstrukturen oder Siedlungsgebiete spielen eine kleinere Rolle für die Landnutzung.

18. Rangendingen – Starzel

Das Einzugsgebiet der Starzel liegt auf der Schwäbischen Alp in der Mitte von Baden-Württemberg und weist eine Fläche von 123,397 km² auf, wodurch es das größte Untersuchungsgebiet dieser Analyse darstellt. Die Hauptfließrichtung zeigt nach Nordwesten und die Starzel mündet letztendlich in den Neckar. Das Gebiet besitzt keine Seen oder Hochwasserrückhaltebecken.

Die Geologie wird zu gleichen Teilen durch Keuper-, Lias-, Dogger- und Malmvorkommen geprägt. Genauso vielfältig wie die Geologie sind auch die Böden, welche von Braunerden, Rendzinen, Pararendzinen und Pelosolen dominiert werden. In den stauwasserbeeinflussten Bereichen in der Mitte des Untersuchungsgebietes können zusätzlich Pseudogleye oder Auenböden auftreten.



A-Karte 18: Landnutzung des Einzugsgebietes der Starzel.

Die Landnutzung (A-Karte 18) besteht zu großen Teilen aus Misch- und Nadelwäldern, sowie Grünlandflächen. Ackerland, Siedlungsflächen und komplexe Parzellenstrukturen nehmen einen nicht zu vernachlässigenden Anteil der Landnutzung ein. Des Weiteren gibt es Obstanbauflächen und Verkehrs- bzw. Industrieflächen, welche einen kleinen Anteil an der Landnutzung besitzen.

19. Rohrhardsberg – Elz

Das Untersuchungsgebiet der Elz liegt im Schwarzwald im Südwesten von Baden-Württemberg und besitzt eine Fläche von 7,348 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Norden, wodurch die Elz ein Teileinzugsgebiet des Rheins darstellt. Es gibt keine Seen oder Hochwasserrückhaltebecken im Untersuchungsgebiet, welche das Abflussverhalten beeinflussen können.

Die Geologie wird durch Granit dominiert, jedoch befinden sich einige metamorphe Gesteinsvorkommen im Nordwesten des Einzugsgebietes. Die Böden werden von Braunerden dominiert, welche teilweise oder vollständig podsoliert sind. In den grundwasserbeeinflussten Bereichen in der Mitte des Untersuchungsgebietes treten zudem Hoch- und Niedermoorböden auf. Es gibt keine Bereiche, welche durch Stauwasser beeinflusst sind.



A-Karte 19: Landnutzung des Einzugsgebietes der Elz.

Die Landnutzung in A-Karte 19 wird durch Misch- und Nadelwälder dominiert. In der Mitte und im Osten des Einzugsgebietes gibt es zudem Grünlandflächen, welche räumlich mit den Moorböden übereinstimmen. Es gibt keine Siedlungsflächen im Einzugsgebiet der Elz.

20. Schwäbisch Gmünd – Rems

Das Untersuchungsgebiet der Rems liegt in der Keuper-Lias Region im Osten von Baden-Württemberg und weist eine Fläche von 95,540 km² auf. Die Hauptfließrichtung zeigt nach Westen, wodurch die Rems in den Neckar mündet. Es gibt keine Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet, jedoch befindet sich ein kleiner See mit einer Fläche von 0,009 km² im Untersuchungsgebiet.

Die Geologie ist durch das Vorkommen von Keuper im Westen, Lias und Dogger in der Mitte, sowie Malm im Osten des Untersuchungsgebietes geprägt. Den dominierenden Bodentyp stellt die Braunerde dar, welche teilweise oder vollständig podsoliert sein kann. Es gibt des Weiteren große Vorkommen an Rendzinen, Pararendzinen, Parabraunerden oder Pelosolen. In den durch Grund- oder Stauwasser beeinflussten Bereichen treten zudem verschiedene Gleye oder Auenböden auf.



A-Karte 20: Landnutzung des Einzugsgebietes der Rems.

Die Landnutzung der Rems (A-Karte 20) ist hoch komplex. Laub- und Mischwälder, sowie Grünlandflächen machen den größten Teil der Landnutzung aus. Außerdem sind Ackerflächen und komplexe Parzellenstrukturen nicht zu vernachlässigen. Siedlungsflächen und Verkehrs- bzw. Industrieflächen machen einen verhältnismäßig großen Anteil der Landnutzung aus.

21. Ummendorf – Umlach

Das Einzugsgebiet der Umlach liegt auf der Donau-Iller-Lech Platte im Südosten von Baden-Württemberg. Es besitzt eine Gesamtfläche von 88,722 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Norden, wodurch die Umlach in die Donau mündet. Das Einzugsgebiet besitzt keine Hochwasserrückhaltebecken, jedoch einen kleinen See mit einer Fläche von 0,007 km².

Die Geologie wird durch Altmoränen und Terrassen geprägt, welche aus feinkörnigen Sedimentgesteinen bestehen. Die dominierende Bodenart sind die Parabraunerden. Des Weiteren gibt es großflächige stau- oder grundwasserbeeinflusste Flächen, auf welchen Gleye oder Auenböden entstehen. Auch einige Hoch- und Niedermoorflächen sind über das Einzugsgebiet verteilt.



A-Karte 21: Landnutzung des Einzugsgebietes der Umlach.

Die Landnutzung (A-Karte 21) ist durch Grünlandflächen und komplexe Parzellenstrukturen dominiert. Außerdem nehmen Ackerflächen und Nadel- oder Mischwälder einen großen Anteil ein. Siedlungsgebiete machen lediglich einen kleinen Teil der Landnutzung im Einzugsgebiet der Umlach aus.

22. Unterlenningen - Lauter

Das Untersuchungsgebiet der Lauter befindet sich auf der Schwäbischen Alp in der Mitte von Baden-Württemberg und besitzt eine Fläche von 56,680 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Nordwesten, wodurch die Lauter ein Teileinzugsgebiet des Neckars darstellt. Es treten keine Seen oder Hochwasserrückhaltebecken im Untersuchungsgebiet auf.

Die Geologie ist durch das großflächige Vorkommen von Malm geprägt, wobei sich punktuell vulkanische Gesteine beimischen. Die Böden werden von Rendzinen und Pararendzinen dominiert. Des Weiteren treten Kolluvien aus Abschwemmassen auf. Im südlichen Teil des Untersuchungsgebiets gibt es zudem gemischte Böden aus Braunerden und Terra fusca. Es gibt keinen Einfluss durch Stau- oder Grundwasser auf die Bodenbildung.



A-Karte 22: Landnutzung des Einzugsgebietes der Lauter.

Die Landnutzung (A-Karte 22) ist durch Laubwälder geprägt. Nachfolgend spielen komplexe Parzellenstrukturen, Grünland, sowie Ackerflächen eine wichtige Rolle. Im Nordwesten gibt es große Obstanbauflächen. Siedlungsgebiete machen einen kleinen Anteil der Landnutzung aus.

23. Untermünstertal – Neumagen

Das Einzugsgebiet der Neumagen liegt im Hochschwarzwald im Südwesten von Baden-Württemberg und weist eine Fläche von 66,216 km² auf. Die Hauptfließrichtung zeigt nach Westen, wodurch die Neumagen in den Rhein mündet. Es treten keine Seeflächen oder Hochwasserrückhaltebecken im Untersuchungsgebiet auf.

Die Geologie ist durch metamorphe Gesteine geprägt, wobei im Süden einige Granitvorkommen auftreten. Die Böden sind durch Braunerden dominiert, welche teilweise oder vollständig podsoliert sein können. An den steilen Hangbereichen können Regosole oder Ranker auftreten. In den flachen Talbereichen, welche grundwasserbeeinflusst sind, können Gleye oder Auenböden entstanden sein.



A-Karte 23: Landnutzung des Einzugsgebietes der Neumagen.

Die Landnutzung in A-Karte 23 ist an den Hängen des Untersuchungsgebietes durch Misch- und Nadelwälder geprägt. Auf den Hochebenen und in den Talbereichen tritt großflächig Grünland an deren Stelle. Siedlungsgebiete kommen nur in den Tälern im Westen vor.

24. Unterspeltach - Speltach

Das Einzugsgebiet der Speltach liegt in der schwäbischen Keuper-Lias Region im Nordosten von Baden-Württemberg. Es besitzt eine Fläche von 33,036 km². Die Hauptfließrichtung zeigt nach Osten, wodurch die Speltach in den Neckar mündet. Es treten keine Seen oder Hochwasserrückhaltebecken im Untersuchungsgebiet auf.

Die Geologie ist durch großflächige Keupervorkommen geprägt, wobei vereinzelt auch holozäne Auenaufschüttungen zu Tage treten. Die Böden sind durch Braunerden dominiert, welche teilweise oder vollständig podsoliert sein können. Stellenweise können zusätzlich Pelosole auftreten. In den stau- oder grundwasserbeeinflussten Bereichen können zudem Gleye vorkommen.



A-Karte 24: Landnutzung des Einzugsgebietes der Speltach.

Die Landnutzung (A-Karte 24) ist durch großflächige Acker- und Grünlandflächen geprägt. An den Rändern des Gebietes treten zudem große Laub-, Misch- und Nadelwälder auf. Komplexe Parzellenstrukturen und Siedlungsgebiete spielen eine untergeordnete Rolle für die Landnutzung.

25. Wehr – Hasel

Das Untersuchungsgebiet der Hasel liegt im Übergangsbereich des Schwarzwaldes in den Oberrheingraben im Südwesten von Baden-Württemberg. Es besitzt eine Fläche von 26,636 km². Die Fließrichtung der Vorfluter zeigt nach Süden, wodurch die Hasel in den nahegelegenen Rhein mündet. Es gibt keine Seen oder Hochwasserrückhaltebecken im Untersuchungsgebiet.

Die Geologie ist durch Granitvorkommen im Norden und Muschelkalk im Süden unterteilt. Dies spiegelt sich auch in den Bodentypen wieder, welche im Süden durch Parabraunerden und Pelosolen geprägt ist. In den grundwasserbeeinflussten Bereichen können zudem Gleye oder Auenböden entstehen. Der Norden wird durch Braunerden dominiert, welche teilweise oder vollständig podsoliert sein können.



A-Karte 25: Landnutzung des Einzugsgebietes der Hasel.

Die Landnutzung (A-Karte 25) ist im Norden durch Mischwälder und Grünland geprägt. Im Süden kommen vermehrt Nadelwälder und komplexe Parzellenstrukturen zur Landnutzung hinzu. Auch alle Siedlungsgebiete befinden sich im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes, jedoch machen diese nur einen kleinen Teil der Landnutzung aus.

26. Wittelbach - Schutter

Das Einzugsgebiet der Schutter befindet sich im Hochschwarzwald im Südwesten von Baden-Württemberg und weist eine Fläche von 48,876 km² auf. Die Hauptfließrichtung zeigt nach Norden und die Schutter stellt ein Teileinzugsgebiet des Rheins dar. Es gibt keine Seeflächen oder Hochwasserrückhaltebecken im Untersuchungsgebiet.

Die Geologie wird sowohl durch metamorphe Gesteine als auch Buntsandsteinvorkommen im Westen des Einzugsgebietes geprägt. Die Böden sind durch Braunerden dominiert, welche teilweise oder vollständig podsoliert sein können. Durch Lössdeckschichten können zudem Parabraunerden entstehen. In den grundwasserbeeinflussten Talbereichen können zusätzlich Gleye oder Auenböden auftreten.



A-Karte 26: Landnutzung des Einzugsgebietes der Schutter.

Die Landnutzung (A-Karte 26) ist zum größten Teil durch Mischwälder dominiert. In den Talbereichen treten zudem komplexe Parzellenstrukturen oder Grünlandflächen auf. Siedlungsflächen nehmen einen kleinen Anteil in den Tälern des Untersuchungsgebietes ein.

Anhang II – Szenario 1



A-Abbildung 1: Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 1 und den 25 vorhandenen Untersuchungsgebieten.



A-Abbildung 2: Prozentuale Abweichung der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 2 und den 25 vorhandenen Untersuchungsgebieten.

Anhang II – Szenario 1



A-Karte 27: Prozentuale Abweichung des Horton'schen Oberflächenabfluss in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 1 berechnet.

Anhang II – Szenario 1



A-Karte 28: Prozentuale Abweichung des Basisabflusses in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 1 berechnet.

Anhang II – Szenario 1



A-Karte 29: Prozentuale Abweichung des Zwischenabflusses in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 1 berechnet.

Anhang III – Szenario 2



A-Abbildung 3: Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 2 und den 25 vorhandenen Untersuchungsgebieten.

Anhang III – Szenario 2



A-Abbildung 4: Vergleich der berechneten Abflusskomponenten aus den BFI Kurven mit den RoGeR Abflusskomponenten für das Szenario 2 und den 25 vorhandenen Untersuchungsgebieten.



A-Karte 30: Prozentuale Abweichung des Horton'schen Oberflächenabfluss in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 2 berechnet.



A-Karte 31: Prozentuale Abweichung des Basisabflusses in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 2 berechnet.

Anhang III – Szenario 2



A-Karte 32: Prozentuale Abweichung des Zwischenabflusses in seiner räumlichen Verteilung über ganz Baden-Württemberg. Die prozentuale Abweichung wurde aus den 25 vorhandenen BFI Kurven für das Szenario 2 berechnet.

Ehrenwörtliche Erklärung

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

Ort, Datum

Unterschrift