Professur für Hydrologie

der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Kai Schmidt

Vorhersage von Oberflächenabflüssen bei Starkregen in komplexen urbanen Einzugsgebieten



Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler Freiburg i. Br., Dezember 2016

Professur für Hydrologie

der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Kai Schmidt

Vorhersage von Oberflächenabflüssen bei Starkregen in komplexen urbanen Einzugsgebieten

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler **Korreferent:** apl. Prof. Dr. Jens Lange

Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler Freiburg i. Br., Dezember 2016

Inhaltsverzeichnis

Abl	bildun	gsverze	ichnis	III
Tał	oellenv	verzeich	nis	VII
Zus	samme	enfassur	ng	IX
1	Einl	eitung		1
	1.1	Stand	der Forschung	1
2	Prot	olemstel	lung und Zielsetzung	8
3	Metl	hoden u	nd Vorgehensweise	9
	3.1	Unters	suchungsgebiet	9
		3.1.1	Dachflächen	12
		3.1.2	Gully-Einzugsgebiete	12
	3.2	Das M	Iodell RoGeR	16
		3.2.1	Interzeption und Matrixinfiltration	17
		3.2.2	Infiltration durch Makroporen und Schrumpfungsrisse	
		3.2.3	Bodenspeicher, TP, ZA und SFA	
		3.2.4	Abflusskonzentration	19
		3.2.5	Datengrundlage	19
	3.3	Datena	aufbereitung und Parametrisierung	19
		3.3.1	Gebietseigenschaften	19
		3.3.2	Niederschlags- und Abflussdaten	24
	3.4	Model	llierung	
	3.5	Validi	erung	
4	Erge	ebnisse		
	4.1	Dachf	lächen	

		4.1.1	Kiesdach2	27
		4.1.2	Extensive Dachbegrünung	29
		4.1.3	Intensive Dachbegrünung	29
		4.1.4	Konventionelle Dachfläche	\$1
	4.2	Gully-	Einzugsgebiete	\$4
		4.2.1	Messstelle v19	\$4
		4.2.2	Messstelle v20	\$4
		4.2.3	Messstelle v21	\$7
		4.2.4	Messstelle v22	\$7
		4.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse4	0
5	Disku	ussion		1
6	Fazit	und Au	usblick4	6
Lite	raturv	erzeich	unis4	19
Abk	ürzun	gsverze	eichnis	56
Ehr	enwör	tliche E	Crklärung5	59

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Lage Freiburgs im Südwesten Deutschlands.
Abb. 2:	Luftbilder der Vauban-Kaserne 1992 (links) und des fertiggestellten Stadtteil Vauban im Jahr 2012 (Stadt Freiburg)
Abb. 3:	Übersichtsplan der temporären und dauerhaften Messstellen im Vaubanprojekt
	Die dunkelgrünen Bereiche markieren die Lage der MRS (Jackisch et al. 2013
	10
Abb. 4:	Überblick über den Stadtteil Vauban mit der Aufteilung des Gebietes in
	Mischkanalisation (hellblau) und Trennkanalisation (mittelblau). Gemäß de
	Flächennutzung farblich abgesetzt die untersuchten Dachflächen und Gully
	Einzugsgebiete. Am linken Rand mündet der Überlauf des Mulden-Rigolen
	Systems in den Vorfluter (Dorfbach).
Abb. 5:	Darstellung der Lage der unterschiedlichen Flächenklassen im EZG de
	Messstation v19 sowie ihre Anteile an der Gesamtfläche. Es ist das Gebiet mi
	dem höchsten Anteil an (teil-)versiegelten Flächen.
Abb. 6:	Darstellung der Lage der unterschiedlichen Flächenklassen im EZG de

- Messstation v20 sowie ihrer Anteile an der Gesamtfläche. Zweitgrößtes EZG, dominiert von begrünten Dächern. 15
- Abb. 7:Darstellung der Lage der unterschiedlichen Flächenklassen im EZG der
Messstation v21 sowie ihrer Anteile an der Gesamtfläche. Kleinstes der
untersuchten EZGs, höchster Anteil an konventionellen Dachflächen.15
- Abb. 8:Darstellung der Lage der unterschiedlichen Flächenklassen im EZG der
Messstation v22 sowie ihrer Anteile an der Gesamtfläche. Größtes EZG, alle
definierten Flächenklassen sind enthalten.16
- Abb. 9:Konzeptionelle Darstellung der in RoGeR implementierten Modellvorstellungen
und abflussbildenden Prozesse (Steinbrich et al. 2016).17

- Abb. 10: Messstelle v06, Kiesdach. Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss sowie den beitragenden Abflusskomponenten für drei Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität. Der Abflussbeiwert C_{sim}, die NSE und die Abflusskomponenten beziehen sich auf das mittlere Szenario.
- Abb. 11: Messstelle v07, extensive Dachbegrünung. Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss sowie den beitragenden Abflusskomponenten für drei Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität. Der Abflussbeiwert C_{sim} , die NSE und die Abflusskomponenten beziehen sich auf das mittlere Szenario. 30
- Abb. 12: Messstelle v26, intensive Dachbegrünung. Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss sowie den beitragenden Abflusskomponenten für drei Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität. Der Abflussbeiwert C_{sim}, die NSE und die Abflusskomponenten beziehen sich auf das mittlere Szenario.
- Abb. 13:Messstelle v27, konventionelles Dach (Eternit). Darstellung von Niederschlag,
gemessenem und simulierten Abfluss für drei Niederschlagsereignisse
unterschiedlicher Intensität.33
- Abb. 14:Messstellev19,Gulli-Einzugsgebiet.DarstellungvonNiederschlag,gemessenemundsimuliertenAbflussfürdreiNiederschlagsereignisseunterschiedlicherIntensität.35
- Abb. 15: Messstelle v20, Gully-EZG. Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss sowie den beitragenden Abflusskomponenten für drei Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität. Der Abflussbeiwert C_{sim}, die NSE und die Abflusskomponenten beziehen sich auf das mittlere Szenario.

36

- Abb. 16: Messstelle v21, Gully-EZG. Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss für drei Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität.
- Abb. 17: Messstelle v22, Gully-EZG. Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss sowie den beitragenden Abflusskomponenten für drei

Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität. Der Abflussbeiwert C_{sim} , die NSE und die Abflusskomponenten beziehen sich auf das mittlere Szenario. 39

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Bezeichnung der Messstellen und die zugehörige Dachart.	12
Tab. 2:	Bezeichnung der Gully-Einzugsgebiete sowie die Anteile der verschiede Flächennutzungen daran in Quadratmeter und Prozent.	enen 13
Tab. 3:	Übersicht über die Parametrisierung der verschiedenen Dacharten.	22
Tab. 4:	Übersicht über die Parametrisierung von Asphalt-, Grün- und Pflasterflächen	. 23
Tab. 5:	Die EZGs und die jeweils zur Modellierung verwend Niederschlagsereignisse.	eten 24
Tab. 6:	Die zur Modellierung verwendeten Niederschlagsereignisse sowie d Summe, Dauer und Intensität.	eren 24

Zusammenfassung

In den letzten Jahren häufen sich Meldungen über große Schäden durch Überflutungen nach heftigen Unwettern. Um solche Überflutungen vorherzusagen, werden in der Regel Niederschlags-Abfluss-Modelle eingesetzt. Bei den meisten etablierten Niederschlags-Abfluss-Modellen handelt es sich um Konzeptmodelle mit geringer physikalischer Grundlage, die daher auf die Kalibrierung mit Daten von Flusspegeln angewiesen sind. Für kleine (Kopf-) Einzugsgebiete ist eine Vorhersage daher mangels Pegeldaten häufig schwierig.

In städtischen Einzugsgebieten sind etablierte N-A-Modelle häufig nicht mehr dazu in der Lage den Abfluss korrekt zu ermitteln, weil dort im Zuge des Trends einer nachhaltigen Regenwasserbewirtschaftung zunehmend komplexe Strukturen wie Gründächer und Versickerungsanlagen Einzug halten.

An der Professur für Hydrologie Freiburg wurde das physikalisch basierte N-A-Modell **RoGeR** (**Runo**ff **Ge**neration **R**esearch) entwickelt, das mit räumlich wie zeitlich hoch aufgelösten Rasterdatensätzen arbeitet und somit ohne Kalibrierung auf Einzugsgebiete beliebiger Größe angewandt werden kann. Auf überwiegend natürlichen Einzugsgebieten der Hang- und Mesoskale wurde es bereits erfolgreich validiert.

In dieser Arbeit wurde RoGeR auf Versuchsflächen verschiedener Größe in einem wissenschaftlich gut untersuchten urbanen Einzugsgebiet mit dezentraler Regenwasserbewirtschaftung angewandt. Es sollte untersucht werden, inwieweit RoGeR geeignet ist, die Abflussbildung- und Konzentration an dieser Schnittstelle zwischen urbanen und ruralen Gebieten zu testen und welche Parametrisierung dafür auf den untersuchten Flächen nötig ist.

Trotz Unsicherheiten verschiedenen Ursprungs konnte für verschiedene Skalen und Oberflächen eine gute Repräsentation der beobachteten Abflussganglinien festgestellt werden. Desweiteren wurde herausgefunden, dass die Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeit auf Gründächern weit über den reinen Materialeigenschaften des verwendeten Substrats liegen und die Vorfeuchte für die korrekte Simulation der Abflussbildung eine große Rolle spielt.

1 Einleitung

In den letzten Jahren häufen sich die Meldungen von über die Ufer getretenen Flüssen und gefluteten Städten zunehmend. Bestes Beispiel sind die schweren Unwetter im Mai diesen Jahres, die besonders die östlichen Zuflüsse von Neckar und Donau trafen. Innerhalb weniger Stunden fielen dort bis zu 100 Millimeter Niederschlag pro Quadratmeter, welche in kürzester Zeit selbst kleine Dorfbäche an Kocher und Jagst zu reißenden Strömen werden ließen. In den Ortschaften entlang der Flüsse zeigte sich anschließend ein Bild der Zerstörung. Die Medien sprachen unter anderem vom schwersten Hochwasser seit 20 Jahren (F.A.Z. 2016; Landesschau Aktuell 2016; Tagesschau 2016).

Dabei sind es vor allem Eingriffe des Menschen selbst, zum Beispiel die Versiegelung und Bebauung offener Flächen oder die Einengung und Umstrukturierung natürlicher Gewässer, welche das Abflussverhalten von Flüssen und Bächen verändern. Außerdem verstärken klimatische Veränderungen im Zuge des ebenfalls anthropogen Klimawandels die Häufigkeit und die Ausprägung von Extremereignissen (Berg et al. 2013; Trenberth 2011). Es gilt daher, in Zukunft die Vorhersage solche Extremereignisse zu verbessern, um vorhandene städtische Strukturen zu schützen und die Bevölkerung besser warnen zu können. Außerdem können dann Lösungen gefunden werden, große Niederschlagsmengen zurückzuhalten, bevor sie ein Hochwasser verursachen. Um bestimmte Szenarien durchzuspielen bevor sie eintreten, sind Computermodelle notwendig, die eine Beziehung zwischen dem gefallenen Niederschlag und dem daraus entstehenden Abfluss herstellen.

In dieser Arbeit soll ein solches Niederschlags-Abfluss-Modell (N-A-Modell) auf ein neues potenzielles Einsatzgebiet angewandt werden. Dafür werden im Folgenden zunächst die nötigen Grundlagen erläutert.

1.1 Stand der Forschung

Für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung existieren verschiedene Arten von Modellen, die aufgrund ihrer Struktur häufig in drei Klassen eingeteilt werden (Definitionen nach Wagener et al. 2004). Die einfachste Form bilden **Black-Box-Modelle**, deren Modellstruktur und Parameter allein aus den vorliegenden Input-Output-Daten abgeleitet werden. Sie beinhalten

keinerlei Prozessverständnis des zugrundeliegenden Systems, das gesamte Einzugsgebiet (EZG) wird als eine Einheit betrachtet. Durch die enge Datenbindung sind sie auf die Anwendung im EZG, auf das sie kalibriert wurden beschränkt und nicht auf andere übertragbar.

Werden zur Abbildung des Gesamtsystems unterschiedliche Speicher (Bodenspeicher, Grundwasserspeicher usw.) verwendet, spricht man von **Grey-Box-** oder **Konzeptmodellen**. Diese Speicher werden durch Zuflüsse wie Niederschlag und Infiltration gefüllt, durch Verdunstung oder Abfluss geleert und können auch miteinander in Verbindung stehen. Die Modellstruktur wird im Vorfeld so bestimmt, dass die Gegebenheiten im EZG funktionell abgebildet sind. Die Parameterwerte, die letztendlich die Größe der Speicher und die Flüsse zwischen ihnen bestimmen, werden aber wie bei Black-Box-Modellen ebenfalls in einem Kalibrierungsprozess festgelegt. Häufig werden mehrere Parameter zusammengefasst (*lumped parameter model*) oder ein großes EZG durch verschiedene kleinere abgebildet (*semidistributed*). Die meisten in der Praxis angewandten Modelle sind dieser Kategorie zuzuordnen.

Im Gegensatz zu Black-Box-Modellen, die kein Prozessverständnis voraussetzen, versuchen **White-Box-Modelle**, die Realität möglichst exakt anhand der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse zu beschreiben. Sie werden deshalb auch als physikalische Modelle bezeichnet. In der Regel wird das Untersuchungsgebiet dafür in Raster oder ähnliche kleinteilige Parzellen unterteilt (*distributed*). Aufgrund der hohen Komplexität sind sie rechenaufwendig und benötigen eine sehr gute Datengrundlage, kommen dadurch aber ohne die Kalibrierung von Parametern aus. Für eine Validierung der Simulation sind Abflussdaten des untersuchten Gebietes trotzdem von Vorteil. Beven ging 1989 noch sehr kritisch mit den Erwartungen an physikalisch basierte Modelle um. Unter anderem sah er Schwächen in ihrer groben Auflösung von damals 250 mal 250 Metern und dass sie genau wie *lumped parameter models* den großen Unsicherheiten der Eingangsdaten unterliegen.

Abgesehen von dieser konzeptionellen Einteilung sind die Übergänge zwischen den Modellarten häufig fließend und abhängig von der Anwendung werden mehr oder weniger Elemente eines Modelltyps in die jeweilige Modellstruktur übernommen.

Weil in der Realität schwer umsetzbar haben sich vollkommen physikalisch basierte Modelle bislang nicht flächendeckend durchgesetzt. Unter der Vielzahl von Modellen für die Simulation von Wasserhaushalt und Niederschlags-Abfluss-Verhalten sind die meisten der etablierten und bewährten Modelle immer noch Konzeptmodelle, die nur in manchen Fällen physikalisch basierte oder messbare Eingangsparameter beinhalten. Dazu gehören auch die im deutschsprachigen Raum bekannten hydrologischen N-A-Modelle LARSIM (Bremicker 2000) und WaSiM-ETH (Schulla 1997). Beide sind deterministische, flächendifferenzierte Modelle. Berücksichtigt werden neben dem Bodenspeicher auch die Verdunstung, Schneeakkumulation und –schmelze sowie Interzeption. Aufgrund ihrer Kombination von physikalisch basierten und konzeptionellen Prozessbeschreibungen kommen sie nicht ohne Kalibrierung aus. Durch seine Herkunft und die implementierten Prozesse fand WaSiM-ETH häufig Anwendung im alpinen Raum (Gurtz et al. 2003; Jasper et al. 2002; Rößler und Löffler 2010; Verbunt et al. 2003). LARSIM wurde unter anderem für die Flussgebietsmodellierung des Neckar eingesetzt und bildet nunmehr die Grundlage der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) in Baden-Württemberg (Bremicker et al. 2004).

Modelle wie diese bieten in großen Einzugsgebieten (EZGs) eine zuverlässige Vorhersage der Abflussreaktion für Niederschläge mit großer Ausdehnung, weil sie mit Abflussmessungen an Pegeln sehr gut kalibriert werden können. Für kleine EZG stehen solche Daten häufig nicht zur Verfügung. Außerdem spielen in diesen Gebieten häufig räumlich sehr variable konvektive Niederschlagsereignisse eine große Rolle, die lokal schnell große Abflussmengen produzieren können. Im Zuge des Klimawandels wird diese Art von Niederschlag vermutlich noch öfter auftreten als es bisher der Fall war (Berg et al. 2013; Trenberth 2011). Da sich Modelle wie LARSIM oder WaSiM-ETH nicht skalieren lassen, ist eine Vorhersage für kleinere (Sub-)Einzugsgebiete des jeweiligen Pegels nicht möglich.

In der Vergangenheit gab es bereits verschiedene Ansätze, diese Problematik anzugehen, keiner konnte jedoch eine ganzheitliche Lösung entwickeln. Regionalisierungsansätze zur Bestimmung von Abflusskoeffizienten sind auf festgelegte EZG-Größen begrenzt, müssen ebenfalls kalibriert werden (DVWK 1984; Merz 2006) und bieten zudem keine Möglichkeit, die zeitliche Veränderung von Vorfeuchte und Niederschlagscharakteristik zu berücksichtigen (Steinbrich et al. 2016). Die von Markart et al. (2006) entwickelte Methode zur Bestimmung von Abflussbeiwertsklassen unter Berücksichtigung vieler Faktoren und Prozesse in einem alpinen EZG war wiederum nicht auf andere Regionen übertragbar. Andere Versuche, Abflussbildungsprozesse in hoher räumlicher Auflösung zu identifizieren, konnten diese nicht quantifizieren (LUWG 2006). Diese Tatsachen veranlassten Steinbrich et al. zur Entwicklung eines neuen N-A-Modells unter Berücksichtigung aller relevanter Prozesse.

Basierend auf dem Wissen der Abflussforschung der letzten Jahrzehnte (u.a. Weiler et al. 1998; Weiler und Flühler 2004; Weiler 2005) wurde an der Professur für Hydrologie in Freiburg das N-A-Modell RoGeR (**R**unoff-Generation-Research) entwickelt. Es handelt sich um ein physikalisches Modell, das detaillierte, räumlich verteilte Informationen zu Boden, Geologie, Landnutzung etc. verarbeitet. Seine erste Anwendung fand es zur Bestimmung von Ab-

flusskomponenten für den Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WaBoA) (Steinbrich und Weiler 2012). Ziel war es ein Modell zu schaffen, das eine Anwendung über mehrere Skalenbereiche hinweg in hoher räumlicher (1 m²) und zeitlicher (5 min) Auflösung ermöglicht. Dadurch ist letztendlich keine Kalibrierung von Parametern nötig und das Modell auf beliebige EZGs anwendbar. Die Funktion von RoGeR wurde bisher auf überwiegend unversiegelten Flächen der Hang- und Mesoskale validiert und konnte die beobachteten Abflüsse dort zufriedenstellend repräsentieren. Eine Bewertung der Übereinstimmung von beobachtetem und simuliertem Abfluss wurde anstatt klassischer Gütemaße wie R², der Nash-Sutcliffe-Efficiency oder der Kling-Gupta-Efficiency mit einer Klassifizierung in "gute", "mäßige" und "unbefriedigende Übereinstimmung" durchgeführt. Keines der zur Verfügung stehenden Gütemaße konnte der subjektiven Wahrnehmung einer korrekten Abbildung des Abflusses gerecht werden. Sowohl konvektive Ereignisse mit hohem Spitzenabfluss und schnellen Rezessionen wie auch advektive Ereignisse mit gemäßigtem Maximum und langsamer Rezession wurden ordentlich abgebildet. Die größten Abweichungen vom gemessenen Abfluss gingen dabei auf eine Unterschätzung des Zwischenabflusses im Modell, Fehler bei der Abflussmessung oder bei der Bestimmung des Niederschlags durch Radar zurück. Kleinere Unsicherheiten entstanden durch lokale Besonderheiten wie Drainagen oder Effekte der Hydrophobie nach anhaltender Trockenheit.

21 von 33 Ereignissen wurden als "gut" bewertet, d.h. Abflussdynamik und –menge wurden zufriedenstellend abgebildet. Fünf wurden mit einer guten Darstellung der Dynamik aber mengenmäßigen Abweichungen als "mäßig" eingestuft. Sieben Simulationen erreichten aufgrund struktureller Besonderheiten im EZG lediglich ein "unbefriedigend". In Anbetracht der teilweise großen Unsicherheiten der Eingangsparameter (Makroporen, Niederschlag) ergaben sich insgesamt sehr gute Modellergebnisse (Steinbrich et al. 2016).

Urbane Einzugsgebiete

Ein wichtiges Gebiet für die Bildung von schnellen Abflusskomponenten stellen allerdings Siedlungsgebiete dar, die in der Regel ein hohen Prozentsatz an versiegelten Flächen aufweisen (Jackisch et al. 2013; Weiler 2016). 2012 wurden von der gesamten Bodenfläche Deutschlands 13.5% von Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV) bedeckt, Tendenz steigend. Die Zunahme der SuV betrug zwischen 1996 und 2012 14.7% (Statistisches Bundesamt 2014). Die Umwandlung von natürlichen Flächen in Bauland bringt zwangsläufig eine Veränderung des Wasserhaushalts mit sich. Jackisch et al. (2013) fanden heraus, dass auf einer vollständig versiegelten Fläche 80% des Niederschlags oberflächlich abfließt. Auf einer unbebauten Grünlandfläche lediglich 5%. Dies hat eine besondere Bedeutung für die Abflussbildung und –konzentration bei Starkregen.

Zur Abschätzung der Abflussbildung in urbanen Gebieten wurden traditionell Modelle der Siedlungsentwässerung eingesetzt, zum Beispiel DR3M–QUAL (Alley und Smith 1982a, 1982b), HSPF (Becknell et al. 1993), SWMM (Huber et al. 1984; Huber und Dickinson 1988) und andere. Diese berücksichtigen Strukturen wie Rohre, Kanäle und Rückhaltebecken, die in der Siedlungsentwässerung zur schnellen Abführung von Niederschlagswasser relevant sind, ebenso wie die Möglichkeit des Stofftransportes (Zoppou 2001). Weil die Abflussbildung im städtischen Bereich überwiegend auf versiegelten Flächen geschieht und wenig komplex ausfällt, sind in die Modellstruktur oft nur einfache Abflussbildungsprozesse integriert oder die zeitliche Auflösung wurde sehr grob gewählt.

Die seit den 1990ern aufgekommene Praxis der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung in Form von Gründächern und Versickerungsanlagen bringt komplexe Systeme in die Siedlungsentwässerung ein, deren Abflussbildung diese Modelle nicht nachempfinden können. Andere Modelle sind zwar auf die Simulation von dezentraler Regenwasserbewirtschaftung und Mulden-Rigolen ausgelegt, allerdings nur konzeptionell, weshalb sie wiederum kalibriert werden müssen (z.B. KOSIM-XL; Jackisch et al. 2013).

Die Komplexität solcher Oberflächen zeigt sich in der Vielzahl an Publikationen, die sich mit der Wirkungsweise von Gründächern und deren Einfluss auf die Abflussbildung in urbanen Gebieten beschäftigt haben (Mentens et al. 2006). Der Einfluss des Aufbaus, der Neigung und der Vegetation der Gründächer wird dabei durchaus kontrovers diskutiert (Czemiel Berndtsson 2010; Getter et al. 2007; Mentens et al. 2006). Getter et al. (2007) berichten von einem vorhandenen Effekt der Dachneigung auf den Rückhalt, welcher demnach bei 2% Neigung am größten und bei 25% am geringsten ausfällt. Sie konnten außerdem über einen Zeitraum von 5 Jahren eine Verdoppelung der organischen Substanz und eine Erhöhung der Wasserspeicherkapazität feststellen. Mentens et al. (2006) berichten über einen Zusammenhang zwischen jährlichem Abfluss und Aufbau der Dachbegrünung, fanden jedoch keine Signifikanz zwischen dem Alter, der Neigung der Dachfläche und dem Abfluss. Andere Arbeiten sprechen der Dicke und den materialspezifischen Eigenschaften die größte Bedeutung zu (Dunnett et al. 2008b; Monterusso et al. 2004; VanWoert et al. 2005). Dunnett et al. (2008b) zeigten sogar, dass von reinem Substrat mehr Wasser zurückgehalten wird als von bepflanztem. Zu physikalischen Kenngrößen wie der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der

Dachbegrünungssubstrate werden in diesen Forschungsarbeiten jedoch keine Angaben gemacht.

Getter und Rowe (2006) haben allgemeine Vorteile von Gründächern im Bezug auf Starkniederschläge, Energiehaushalt und städtische Wärmeinseln erörtert. Andere fokussierten sich auf das Potenzial der nachträglichen Installation von Gründächern und dezentraler Regenwasserbewirtschaftung (RWB) im Bestand (Carter und Jackson 2007; Kaiser 2006). Göbel et al. (2007) führten eine flächendifferenzierte Wasserhaushaltsbilanzierung durch, um Kombination von Flächennutzungen zu erhalten, die trotz Bebauung einen naturnahen Wasserhaushalt ermöglichen.

Allerdings sind Gründächer nicht die einzigen relevanten Strukturen, die die Abflussbildung in der nachhaltigen Stadtentwicklung beeinflussen. Vielmehr ist es ein komplexes Zusammenspiel unterschiedlichster Dacharten und Flächenbefestigungen. Ein weiterer Baustein in diesem Zusammenhang der nachhaltigen Stadtentwässerung ist die Abkehr von vollversiegelten Flächen hin zu durchlässigen Pflasterbelägen. Deren Einfluss auf Verdunstung und Abfluss wurde ähnlich den Gründächern sehr unterschiedlich eingeschätzt (Andersen et al. 1999; Nemirovsky et al. 2013; Starke et al. 2010). Nemirovsky et al. (2013) kommen zu dem Entschluss, dass Niederschlagswasser in der Regel schneller im Untergrund versickert, als es von der Oberfläche verdunstet. Starke et al. (2010) sprechen Pflasterflächen ebenfalls eine hohe Infiltrationsrate und Wasserspeicherkapazität zu, allerdings auch eine gegenüber undurchlässigen Belägen 16% höhere Verdunstung. In einem Versuch zeigten Andersen et al. (1999), dass von einem Niederschlagsereignis mit der Intensität von 15 mm/h auf trockenen Pflasterbelag 55% zurückgehalten werden. Bei feuchten Vorbedingungen immerhin noch 30%. Außerdem zeigten sie ein verzögertes Ansprechen von Abfluss und Sickerwasserfluss durch die Aufsättigung des trockenen Pflasters zu Ereignisbeginn. Überhaupt spielen die Vorfeuchtebedingungen im Bezug auf den Rückhalt von Niederschlagswasser eine große Rolle.

Jackisch et al. führten von 2010 bis 2012 eine Studie zur Evaluation der Wirksamkeit von dezentralen Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen (RWB) durch, wofür ein umfangreicher Satz unterschiedlichster Messdaten erhoben wurde (Jackisch et al. 2013). Untersuchungsgebiet war der Modellstadtteil Vauban in Freiburg im Breisgau, der um die Jahrtausendwende als Prototyp nachhaltiger Stadtentwicklung umgesetzt wurde. Dabei sollte mit der Evaluationsstudie unter anderem überprüft werden, in welchem Umfang der Abfluss des Niederschlagswassers von den RWB und dem nachgeschalteten Mulden-Rigolen-System (MRS) beeinflusst wird. Insbesondere sollte herausgefunden werden, inwieweit der damalige Status quo die ursprünglichen Planungsannahmen erfüllt.

Obwohl Jackisch et al. (2013) die Vorsättigung oberflächlicher Speicher wie Kies- und Gründächer nicht explizit gemessen hatten, konstatierten sie anhand der MRS-Füllstände, der großen Streuung der Messwerte sowie der gesamten Systemreaktion, dass neben klimatischen Faktoren und der Niederschlagscharakteristika die Vorbedingungen einen entscheidenden Einfluss auf den Gebietsabfluss nehmen. Maximale Rückhaltevolumina sind dementsprechend mit geleerten Speichern assoziiert. Stovin (2010) konnte mit einer Gründach-Versuchsfläche beobachten, wie Niederschlagsereignisse nach trockenen Vorbedingungen zunächst vollkommen zurückgehalten wurden. Nach einmaliger Auffüllung waren lange Regenerationsphasen des Bodenspeichers erkennbar, mit der Folge der verminderten Rückhaltefähigkeit während der darauffolgenden Ereignisse, bis hin zur negativen Retention.

Starkniederschläge

Betrachtet man die Abflussbildung auf bestimmten Flächen, so ist eine maßgebliche Einflussgröße dabei der gefallene Niederschlag. Eine häufig verwendete Begrifflichkeit ist in diesem Zusammenhang der Starkniederschlag. Unter Starkniederschlag versteht man im Allgemeinen eine große Menge Niederschlag in einer bestimmten Zeiteinheit, wodurch häufig Überschwemmungen ausgelöst werden (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2016). Ein Starkregenereignis kann zum einen aus einem konvektiven Ereignis mit hoher Intensität in kurzer Zeit bei geringer räumlicher Ausdehnung bestehen. Oder zum anderen durch Warmfronten und Aufgleitschirme mit geringer Intensität aber langer Dauer und großer Ausdehnung bedingt sein (Haberlandt 2016). Definitionen für Starkregenereignisse sind in Deutschland sind laut Rauthe et al. (2014) 10 mm in 15 Minuten oder 35 mm in 24 Stunden, beide mit einem Wiederkehrintervall von rund einem Jahr. Ab 25 mm in einer Stunde oder 35 mm in sechs Stunden spricht der DWD eine Unwetterwarnung aus (DWD 2016).

Je nach Anwendungsbereich wird ein Starkregenereignis aber teils unterschiedlich definiert, etwa anhand fixer Mengen oder statistischer Wiederkehrzeiten. Bezüglich der Häufigkeit gilt ein Niederschlagsereignis dann als stark, wenn es einmal im Jahr oder seltener auftritt (Rauthe et al. 2014). Bei einem Starkniederschlag "definierter Höhe, Dauer und Wahrscheinlichkeit" spricht man wiederum von einem Bemessungsniederschlag, "der für die Dimensionierung von Bauwerken benutzt werden kann" (Haberlandt 2016, S. 62). Dabei werden häufig verschiedene Dauerstufen von 5 min bis 72 Stunden festgelegt und für die variierende Niederschlagsmenge Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeiten berechnet (Haberlandt 2016). Die Auswahl von Starkregenereignissen für diese Arbeit wird in Kapitel 3.3.2 beschrieben.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Steinbrich et al. konnten mit RoGeR ein Modell entwickeln, das auf der Basis flächendeckend vorhandener Daten zu Geologie, Boden, Landnutzung usw. zuverlässig die Abflussbildung und –konzentration auf der Hang- wie auf der Mesoskale beschreibt. In der Theorie kann es aufgrund seiner Modellstruktur auf beliebige EZGs angewandt werden. Diese Arbeit soll zeigen, inwieweit RoGeR auch geeignet ist, um das Zusammenspiel von konventionellen, Grünund Kiesdächern sowie voll- und teilversiegelten Verkehrsflächen realitätsnah zu simulieren. Zusätzlich soll die Modellierung zeigen, wie Grün- und Kiesdächer für weitere Versuche bezüglich ihrer gesättigten Wasserleitfähigkeit zu parametrisieren sind und welche Rolle die Vorfeuchte auf den untersuchten Flächen spielt. Die Forschungsfragen lauten daher:

- (1) Kann das räumlich verteilte, physikalische Modell RoGeR die Abflussbildung in einem komplexen urbanen EZG abbilden?
- (2) Welche Rolle spielt die Vorfeuchte und welche Werte sind für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit auf Grün- und Kiesdächern anzunehmen?

Der Freiburger Stadtteil Vauban bietet hierfür aufgrund seiner dezentralen RWB und dem großen Umfang aufgezeichneter Niederschlags-und Abflussdaten gute Möglichkeiten. Modelliert werden sollen Teilflächen im Untersuchungsgebiet von wenigen Hundert bis zu wenigen Tausend Quadratmetern.

3 Methoden und Vorgehensweise

3.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit bildete der eingangs erwähnte Freiburger Stadtteil Vauban, welcher ab 1996 als Modellstadtteil auf einem aufgegebenen Kasernengelände im Süden der Stadt entstand. 1938 als deutsche Kaserne gegründet, wurde das Gelände nach dem Zweiten Weltkrieg von der französischen Armee übernommen und in Anlehnung an den französischen Festungsbaumeister in Vauban-Kaserne umbenannt. Nach dem Abzug der in Freiburg stationierten französischen Streitkräfte 1992 fiel das rund 38 ha umfassende Areal letztendlich an die Stadt Freiburg, welche für das Gelände 1994 einen städtebaulichen Ideenwettbewerb ausrief und es in den Folgejahren zu einem attraktiven Wohn-Abb. 1: quartier umgestaltete (Abb. 2). Dabei wurde für das städ-



Lage Freiburgs im Südwesten Deutschlands.

tebauliche Konzept neben besonderen energetischen und Mobilitäts-Konzepten (Solartechnik, Holzhackschnitzel-Blockheizkraftwerk und autofreies Wohnen) auch ein innovatives Entwässerungssystem entwickelt (Stadt Freiburg i.Br. 2014; Frey 2013). Dieses beinhaltete die Anlage einer Trennkanalisation für einen Großteil des Gebietes. Dadurch konnten zwei Hauptansätze verfolgt werden: Zum einen die Reduzierung des Oberflächenabflusses durch dezentrale Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen wie Gründächer, Regenwassernutzung, durchlässige Flächenbefestigungen und Grünflächen mit Baumbestand. Zum anderen der Rückhalt von überschüssigem Oberflächenabfluss aus der Fläche in einem zentralen Mulden-Rigolen-System, um die Versickerung ins Grundwasser zu ermöglichen. Lediglich die Niederschlagsmengen, die die Kapazitäten beider Systeme überschreiten, werden dann noch über einen Überlauf an den Vorfluter (Dorfbach) abgegeben (Jackisch et al. 2013). Dadurch soll sowohl durch die Reduzierung der absoluten eingeleiteten Abflussmenge als auch durch die erwirkte zeitliche Verzögerung eine Entspannung der Situation im Hochwasserfall erreicht werden.



Abb. 2: Luftbilder der Vauban-Kaserne 1992 (links) und des fertiggestellten Stadtteils Vauban im Jahr 2012 (Stadt Freiburg).

Die in der Planung getroffenen Annahmen wurden in der Studie von Jackisch et al. (2013) überprüft. Dafür wurde ein Messnetz zur Erhebung von Daten zu Dachabflüssen, Wasserständen, Klimaparametern und Interzeption aufgebaut (Abb. 3). Außerdem wurde für das gesamte Untersuchungsgebiet anhand von Luftbildern und Begehungen vor Ort eine detaillierte Flächenklassifikation durchgeführt.



Abb. 3: Übersichtsplan der temporären und dauerhaften Messstellen im Vaubanprojekt. Die dunkelgrünen Bereiche markieren die Lage der MRS (Jackisch et al. 2013)

Für die in dieser Arbeit durchgeführte N-A-Modellierung wurde auf folgende Daten aus dem Messnetz des Evaluationsprojektes von Jackisch et al. (2013) zurückgegriffen: die Flächennutzungskartierung, Niederschlagsdaten für den Modell-Input und Abflussmessungen an Dachrinnen und Gully-Schächten zur Validierung der Modellergebnisse.

Aufgrund des zeitlichen Umfangs dieser Arbeit wurde auf die Modellierung des gesamten Stadtteils verzichtet und der Fokus zunächst auf einzelne Dachflächen und Straßenzüge im Untersuchungsgebiet gelegt. Dafür wurden aus dem gesamten Messstellennetz insgesamt acht Flächen mit zugehörigen Messstellen ausgewählt (Abb. 4).



Abb. 4: Überblick über den Stadtteil Vauban mit der Aufteilung des Gebietes in Mischkanalisation (hellblau) und Trennkanalisation (mittelblau). Gemäß der Flächennutzung farblich abgesetzt die untersuchten Dachflächen und Gully-Einzugsgebiete. Am linken Rand mündet der Überlauf des Mulden-Rigolen-Systems in den Vorfluter (Dorfbach).

Es handelt sich dabei um Flächen unterschiedlicher Beschaffenheit, deren Art und Zusammensetzung in Kapitel 3.1.1 und 3.1.2 beschrieben wird. Im Fließtext werden die Messstellen aufgrund ihrer Lage im Stadtteil Vauban als "v06", "v19" etc. bezeichnet. Die Bezeichnungen werden auch synonym für deren jeweiliges EZG verwendet. In den Darstellungen sind sie lediglich mit der entsprechenden Nummer versehen.

3.1.1 Dachflächen

Als kleinste untersuchte Einheit wurden für die Modellierung vier Dachflächen ausgewählt, an denen während der Messkampagne des Evaluationsprojektes Abflussmessungen durchgeführt wurden. Dies geschah an den Abläufen eines kiesbedeckten, eines extensiv begrünten, eines intensiv begrünten und eines konventionellen Daches durch Messboxen mit V-Wehr, deren Wasserstand in Abfluss umgerechnet werden konnte.

Die Dachflächen wurden so gewählt, dass alle im Gebiet vorkommenden Dacharten abgedeckt wurden. Für konventionelle Dächer wurde generell eine Neigung von 10° bzw. 17.6% angenommen, für Flachdächer mit Kies- oder Substratbedeckung 3° bzw. 5.2% (Jackisch et al. 2013). Die betrachteten Flächen bestanden jeweils zum größten Teil aus dem genannten Typ der Bedeckung, wobei Teilbereiche auch von teilweise oder komplett versiegelten Bereichen wie Vordächern, Fenster- oder Terrassenflächen eingenommen wurden. Diese wurden in der Modellierung jeweils als versiegelt berücksichtigt. Die Dachart hinter der jeweiligen Bezeichnung ist außer der Farbcodierung in Abb. 4 auch Tab. 1 zu entnehmen.

Bezeichnung	Dachart
v06	Kies
v07	extensive Begrünung
v26	intensive Begrünung
v27	konventionell (Eternit)

Tab. 1: Bezeichnung der Messstellen und die zugehörige Dachart.

3.1.2 Gully-Einzugsgebiete

Für eine zweite, größere Untersuchungsskale neben den Dachflächen wurden vier Messstellen in Einlaufschächten ausgewählt. Diese Schächte entwässern jeweils einen ganzen Straßenzug (sogenannte Wohnanger) über offene Pflasterrinnen und führen den Abfluss dem MRS zu. In den Schächten wurde der Wasserstand gemessen und über eine Kalibrierung der Durchfluss hergeleitet. Ausgewählt wurden diese Gully-Einzugsgebiete (Gully-EZGs) so, dass sie typische Konstellationen der Flächennutzung im Untersuchungsgebiet abbilden. Zwei der EZGs sind dominiert von versiegelten Flächen, eines davon mit einem großen Anteil an Pflasterfläche. Die anderen beiden sind hingegen stärker von begrünten Dachflächen geprägt (siehe Tab. 2 sowie Abb. 5 bis Abb. 8). Im Folgenden wird jeweils auf die Flächennutzungsanteile der vier verschiedenen Anger eingegangen.

	V	19	v2	20	v2	1	v2	2
	Fläche [m²]	Anteil [%]	Fläche [m²]	Anteil [%]	Fläche [m²]	Anteil [%]	Fläche [m²]	Anteil [%]
/Asphalt undurchlässig	246.7	12.1	263.6	15.5	276.4	18.2	286.4	10.5
Pflaster/ durchlässig	1294.0	63.5	132.2	7.7	133.9	8.8	397.8	14.6
Rasenfläche	101.8	5.0	25.8	1.5	2.9	0.2	173.1	6.4
Pflanzfläche	-	-	212.9	12.5	210.2	13.8	305.7	11.2
Kiesdächer	-	-	-	-	-	-	84.9	3.1
Konventionelle Dächer	394.9	19.4	238.2	14.0	896.9	59.0	755.0	27.9
begrünte Dächer	-	-	833.2	48.8	-	-	715.0	26.3
gesamt	2037.4	100	1705.9	100	1520.3	100	2717.9	100

Tab. 2:	Bezeichnung der Gully-Einzugsgebiete sowie die Anteile der verschiedenen Flächennutzun-
	gen daran in Quadratmeter und Prozent.

Das Gully-EZG v19 ist das zweitgrößte und weist von allen die höchste Versiegelung auf. Rund 12% der Fläche sind Verkehrswege mit undurchlässigem Asphalt, 63.5% gepflastert (Versiegelungsgrad 60%). Konventionelle Dachflächen nehmen knapp über 19% ein, während nur 5% der Gesamtfläche von Rasenfläche bedeckt sind (siehe Abb. 5). Ein gewisser Bereich ist mit einer sogenannten wassergebundenen Decke versehen, wurde jedoch als Pflasterfläche kartiert und taucht in der Statistik offiziell nicht auf. Im Zuge der Ergebnisoptimierung wurde dieser Bereich statt als reguläre Pflasterfläche (60% Versiegelung) als unversiegelte Fläche modelliert.

Das mit 1705 m² drittgrößte EZG weist die Messstelle v20 auf. Am dominantesten sind hier die begrünten Dachflächen (Anteil von 48.8%), gefolgt von asphaltierten Verkehrswegen bzw. undurchlässigem Pflaster (15.5%). Kaum weniger Anteil haben konventionelle Dachflächen mit 14%. Rasenflächen bedecken 1.5%, Pflanzflächen 12.5%. Durchlässige Pflasterflächen kommen auf knapp unter 8% (Abb. 6).

Die EZGs v21 und v22 liegen unmittelbar nebeneinander, die Wasserscheide zwischen den nur wenige Meter voneinander entfernt liegenden Gullys verläuft entlang der Längsachse der Straße. v21 besitzt von allen EZGs den höchsten Anteil an konventioneller Dachfläche (59%). Es ist mit 1520 m² das kleinste Gebiet der vier Gully-Messstellen. Undurchlässige Asphaltflächen nehmen 18% ein, Grünflächen 14% und durchlässige Pflasterflächen rund 9% (Abb. 7). Das Einzugsgebiet von Messstelle v22 ist mit über 2700 m² das größte. Es umfasst knapp 28% konventionelle Dächer, 26% mit Dachbegrünung und 3% Kiesdächer. Grünflächen nehmen zusammen etwa 18% der Fläche ein, Pflasterflächen 14.6% und undurchlässige Beläge 10.5% (Abb. 8).



Abb. 5: Darstellung der Lage der unterschiedlichen Flächenklassen im EZG der Messstation v19 sowie ihre Anteile an der Gesamtfläche. Es ist das Gebiet mit dem höchsten Anteil an (teil-)versiegelten Flächen.



Abb. 6: Darstellung der Lage der unterschiedlichen Flächenklassen im EZG der Messstation v20 sowie ihrer Anteile an der Gesamtfläche. Zweitgrößtes EZG, dominiert von begrünten Dächern.



Abb. 7: Darstellung der Lage der unterschiedlichen Flächenklassen im EZG der Messstation v21 sowie ihrer Anteile an der Gesamtfläche. Kleinstes der untersuchten EZGs, höchster Anteil an konventionellen Dachflächen.



Abb. 8: Darstellung der Lage der unterschiedlichen Flächenklassen im EZG der Messstation v22 sowie ihrer Anteile an der Gesamtfläche. Größtes EZG, alle definierten Flächenklassen sind enthalten.

3.2 Das Modell RoGeR

In RoGeR ist eine Vielzahl von Prozessen implementiert, die für die Abflussbildung von Bedeutung sind. Zunächst wird durch Infiltration in die Bodenmatrix (Matrix-Inf) die Füllung des Bodenspeichers in Form von nutzbarer Feldkapazität (nFK) und drainierbarem Porenvolumen (LK) ermöglicht. In der Bodenmatrix sowie in präferenziellen Fließwegen kann Zwischenabfluss gebildet werden (Matrix-ZA; MP-ZA). An der Oberfläche kann sowohl Horton'scher Oberflächenabfluss (HOA) als auch Sättigungsflächenabfluss (SFA) entstehen. Zusätzlich ist die Infiltration von Niederschlag in die Bodenmatrix durch Makroporen und Trockenrisse berücksichtigt (MP-Inf). Die Interzeption von Niederschlag kann in Abhängigkeit der Jahreszeit bemessen werden und Tiefenperkolation (TP) ermöglicht eine Entleerung des Bodenspeichers in tiefere Schichten. Eine Übersicht der Prozesse ist in Abb. 9 zu sehen. Die Beschreibung der implementierten Prozesse folgt im Wesentlichen der Vorstellung des Modells von Steinbrich et al. (2016).



Abb. 9: Konzeptionelle Darstellung der in RoGeR implementierten Modellvorstellungen und abflussbildenden Prozesse (Steinbrich et al. 2016).

3.2.1 Interzeption und Matrixinfiltration

Für die Berücksichtigung der Interzeption wird abhängig von Jahreszeit und Landnutzung der Blattflächenindex geschätzt. Daraus wird ermittelt, wie viel Niederschlagsmenge benötigt wird, um die Speicherfähigkeit der Vegetation zu überschreiten. Erst dann kann Niederschlag den Boden erreichen und ggf. in die Matrix infiltrieren. Da RoGeR bisher rein ereignisbasiert verwendet wurde, ist noch kein Verdunstungsmodul implementiert.

Für die Matrixinfiltration wurde der Ansatz von Green und Ampt (1911) verwendet, optimiert für zeitabhängige Niederschlagsintensität nach Peschke (1985). Zentrale Annahme ist dabei die Ausbreitung einer Sättigungsfront abhängig von Saugspannung, gesättigter hydraulischer Leitfähigkeit, Niederschlagsintensität und dem effektiven Porenvolumen.

Die Saugspannung an der Sättigungsfront wird berechnet nach dem Ansatz von Mein und Larson (1973) und somit geschätzt durch ein Mualem-van Genuchten-Modell (Ippisch et al. 2006), parametrisiert für 32 Bodenklassen gemäß der BK50 (Regierungspräsidium Freiburg - Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau 2015). Die Vorfeuchte wurde aus dem Modell GWN-BW (Modell zur Bestimmung der Grundwasserneubildung in Baden-Würrtemberg) (Gudera und Morhard 2015) übernommen.

3.2.2 Infiltration durch Makroporen und Schrumpfungsrisse

Aufgrund ihrer großen Auswirkung auf die Infiltration und Abflussbildung (Weiler und Flühler 2004) wurden Makroporen und Schrumpfungsrisse in RoGeR implementiert. Voraussetzung für die Infiltration in Makroporen ist die potenzielle Bildung von HOF. Die festgelegte Dichte an Makroporen pro Quadratmeter bestimmt wie groß der Anteil ist, der infiltrieren kann und wie viel als HOF abfließt (Weiler und Flühler 2004). Der eigentliche Infiltrationsprozess von der Makropore in die Matrix entspricht der Gesetzmäßigkeit nach Green & Ampt, erweitert um eine radiale Sättigungsfront (Weiler 2005; Beven und Clarke 1986; Weiler 2005).

Die Länge und Anzahl der Makroporen pro Quadratmeter wurden letztlich über die Landnutzung definiert, da diese übergeordnet die Prozesse steuert, die die Bildung von Makroporen beeinflussen. Die Ausbildung von Schrumpfungsrissen wird in RoGeR als lineare Abhängigkeit der Bodenfeuchte betrachtet und hängt zusätzlich vom Bodentyp gemäß BK50 ab.

3.2.3 Bodenspeicher, TP, ZA und SFA

Die Größe des verfügbaren Bodenspeichers hängt von der Bodenart und den Vorfeuchtebedingungen ab und drückt sich in der freien nutzbaren Feldkapazität (fnFK) sowie der freien nutzbaren Luftkapazität (fLK) aus. Infiltrierender Niederschlag durchwandert die Bodenmatrix und geht als TP in das darunterliegende Gestein über. Übersteigt die Größe des Niederschlags die mögliche TP füllt sich die fnFK von unten her und ermöglicht so die Bildung von Zwischenabfluss (ZA) durch Matrix und Makroporen. Der langsame ZA wird begrenzt durch Darcy, der schnelle durch die Dichte und Konnektivität der Makroporen und das vorhandene Gefälle.

Übersteigt die Niederschlagsmenge das gemeinsame Potenzial von TP und ZA, wird das effektive Porenvolumen aufgefüllt bis schließlich Sättigungsflächenabfluss entsteht. Ein hoch anstehender Grundwasserspiegel begünstigt diesen Prozess.

3.2.4 Abflusskonzentration

Die in RoGeR implementierten Routinen zur Abflusskonzentration waren ursprünglich nur Mittel zum Zweck, um die ermittelten Abflusskomponenten mit Pegeldaten validieren zu können. Sie ermöglichen nun die Festlegung von Fließzeiten separat für jede Abflusskomponente mittels Einheitsganglinienverfahren. Für Oberflächenabfluss wird Schichtfließen von einem Millimeter Höhe angenommen und die Fließgeschwindigkeiten nach Gauckler-Manning-Strickler (GMS) berechnet.

3.2.5 Datengrundlage

Ursprünglich bildeten Datensätze von ganz BW die Grundlage des Modells. Aufgrund seines Aufbaus kann RoGeR aber an sich überall eingesetzt werden, wo räumliche Datensätze verfügbar sind. Momentan liegt die Auflösung der Daten zwischen 1 m² (z.B. Versiegelung und Topographie) und 1 km² (Radar-Niederschlagsdaten), je nach Parameter.

3.3 Datenaufbereitung und Parametrisierung

Vom gesamten Umfang, den RoGeR bietet, wurde letztlich nur ein gewisser Teil genutzt. Zudem mussten im Vergleich zur bisher genutzten Datengrundlage und Parametrisierung Anpassungen vorgenommen werden. Im Folgenden wird die Parametrisierung und die Aufbereitung der Ausgangsdaten beschrieben.

3.3.1 Gebietseigenschaften

Um die Rasterdaten zu generieren, die RoGeR als Input benötigt, mussten die vorhandenen Informationen aufbereitet und fehlende hinzugefügt werden. Die Grundlage lieferte die Flächennutzungskartierung aus dem Evaluationsprojekt, vorliegend als ESRI-Shapefiles. Daraus konnten die EZGs der Messpunkte abgeleitet und die Flächennutzung entnommen werden. Die weiteren nötigen Parameter (siehe Tab. 3 und Tab. 4) wurden den vorhandenen Geometrien in deren Attributtabellen hinzugefügt.

Für das Untersuchungsgebiet war kein vollständiges digitales Höhenmodell (DHM) in hoher Auflösung verfügbar. Deshalb wurde durch das Setzen von einzelnen Höhenpunkten und eine anschließende Interpolation für jedes EZG manuell ein Höhenmodell erstellt. Die Höhenpunkte wurden so definiert, dass die Vorgaben für die Dachneigungen von 3° für Flachdächer und 10° für konventionelle Dächer (Jackisch et al. 2013) erfüllt wurden. Alle anderen Flächen v_{m}

k_{St} R

Vf

k_s

wurden so ausgeformt, dass sich deren Abfluss auf den jeweiligen Messpunkt konzentriert. Das Gefälle und weitere Hilfsgrößen (z.B. Fließlänge zum Auslass) wurden durch GISgestützte Methoden berechnet. Die Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses wurde unter der Annahme von Schichtfließen in Abhängigkeit von Gefälle und Bodenrauigkeit mit der Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler bestimmt:

$$v_m = k_{St} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$$
(1)
oberflächliche Fließgeschwindigkeit [m/s]
Rauheitsbeiwert nach Strickler [m^{1/3}/s]
hydraulischer Radius [m]

I Flieβgefälle [m/m]

Die Fließgeschwindigkeit des Matrixflusses wurde mit dem Darcyschen Gesetz in der Form

$$v_f = k_s \cdot I$$
 (2)
Filtergeschwindigkeit [m/s]
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/s]

I Fließgefälle [m/m]

berechnet. Die Fließzeiten erhält man jeweils durch

$$t = \frac{s}{v} \tag{3}$$

t	Fließzeit [s]
S	Fließlänge zum tiefsten Punkt [m]
v	Fließ-/Filtergeschwindigkeit (v_m bzw. v_f) [m/s]

Die Bodenart des Erdbodens (außerhalb der Dachflächen) wurde gemäß der BK50 (Regierungspräsidium Freiburg - Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau 2015) definiert und nach (Wessolek et al. 2009) parametrisiert. Für die Dachflächen mit Kies und Substrat wurden Bodenklassen gewählt, die aufgrund ihrer Saugspannung an der Sättigungsfront den jeweiligen Belägen gerecht werden. Werte für die damit zusammenhängenden Parameter wie nutzbare Feldkapazität (nFK), freie nFK vor Ereignis (fnFK), freie Luftkapazität vor Ereignis (fLK) und das effektive Porenvolumen wurden der Literatur (Kiesdach; Hölting 1992) oder technischen Datenblättern (VulkaTec Riebensahm GmbH 2016; Optigrün international AG 2016; Bisotherm GmbH 2013) entnommen. Obwohl in der Nomenklatur als intensiv bzw. extensiv unterschieden, wurden beide begrünten Flächen identisch parametrisiert. In der Realität besitzen auch beide einen identischen Aufbau, abgesehen von Topfpflanzen entlang der Terrasse, die den Ausschlag für eine Deklaration als "intensive" Begrünung geben.

In Vorversuchen wurden zunächst Bodenarten, Vorfeuchtebedingungen und k_s-Werte unterschiedlich variiert und kombiniert, um deren Zusammenwirken zu studieren. Letztendlich wurden dann drei Parameterkombinationen simuliert, die in der Lage waren, die Bandbreite der möglichen Abflussszenarien darzustellen. Die erste Kombination war minimale Vorfeuchte (maximale fnFK) mit minimalem k_s-Wert, um in der Folge einen minimalen Abfluss zu generieren. Die zweite Kombination war maximale Vorfeuchte mit einem maximalen k_s-Wert, um einen höchstmöglichen Abfluss zu erreichen. Außerdem wurde ein Ereignis mit mittlerer Vorfeuchte und mittlerem k_s-Wert gerechnet. Für größtenteils versiegelte EZGs (v19, v21, v27) wurde jeweils nur ein Szenario mit minimaler Vorfeuchte simuliert.

Die Bodenmächtigkeit wurde gemäß den von Jackisch und Weiler (2013) genannten Werten festgelegt, der Versiegelungsgrad anhand der vorliegenden Flächennutzungskartierung. Die Tiefenperkolation (TP) konnte für die Dachflächen nur als sehr gering und nicht gleich Null angenommen werden, da das Modell ansonsten von anstehendem Grundwasser ausgegangen wäre. Für Grünflächen und unter Pflasterbelag wurde unter Annahme sehr tiefgründiger Böden eine TP entsprechend dem k_s -Wert festgesetzt.

Trockenrisse und Makroporen spielten auf den Dachflächen keine Rolle. Für Grünflächen in den Gully-EZGs wurden Makroporen gemäß der Nutzungsklasse Grünland festgelegt (Steinbrich und Weiler 2012), allerdings nur zur Versickerung von NS ohne ein Fließzeitenraster zur Abflusskonzentration. Die Interzeption von NS durch Bewuchs wurde nicht berücksichtigt. In Tab. 3 und Tab. 4 sind alle Parameter, die entsprechenden Werte und ihre Quelle bzw. Herleitung aufgeführt.

Alle Berechnungen und Darstellungen wurden mit den Programmen ArcMap (Version 10.2.2) der Firma ESRI und der freien Geoinformationssoftware QGIS (Version Lyon) durchgeführt.

Tab. 3: Übersicht über die Parametrisierun	ng der verschiedene	en Dacharten.		
Parameter	Einheit	Kies	konventionell	Substrat (intensiv/extensiv)
Einzugsgebiet ¹	[-]	0/1	0/1	0/1
Höhenmodell ²	[m]	Höhenraster	Höhenraster	Höhenraster
Gefälle ^{1,3}	[%]	5.2% (3°)	17.6% (10°)	5.2% (3°)
Fließzeit OA zum Auslass ⁴	[min]	t=s/v _m ; k _{st} =35	t=s/v _m ; k _{st} =90	t=s/v _m ; k _{st} =20
Fließzeit ZA zum Auslass	[min]			
Fließzeit Matrix ⁵	[min]	t=s/v _f ; k _s		t=s/v _f ; k _s
Bodenart ⁶	Ξ	BID 17	(BID 13) ⁹	BID 13
nFK ⁷	[mm]	2.5 (5%)	0	18 (30%)
Freie nFK vor Ereignis ⁷	[mm]	2.5 / 1.25 / 0	0	18/9/0
Freie LK vor Ereignis ⁷	[mm]	7.5 (15%)	0	18 (30%)
Effektives Porenvolumen ⁷	[mm]	10 (20%)	0	36 (60%)
Gesättigte Hydraulische Leitfähigkeit ($k_{\rm s}$)	[h/mm]	36000/198000/360000	0	3000/181800/360000
Bodenmächtigkeit ³	[cm]	Q	0	9
Grad der Versiegelung ¹	[%]	0	100	0
Tiefenperkolation ⁸	[h/mm]	0.0001	0	0.0001
Trockenrisstiefe	[cm]	0	0	0
Markoporendichte vertikale MP	[/m²]	0	0	0
Markoporenlänge vertikale MP	[cm]	0	0	0
Markoporendichte horizontale MP	[/m²]	0	0	0
¹ GIS (1=Teil des EZG) ² manuell definiert ¹ ⁷ Hölting 1992 / Produktdatenblätter ⁸ ungleicl	und interpoliert ³ , h 0, sonst kein Ma	Jackisch et al. 2013 ⁴ GMS-Fo trixfluss (durch Programmierung	rmel: v _m =k _{st} *R ^{2/3} +1 ^{1/2 5} 3 definiert) ⁹ egal, weil v	Darcy (Hölting 1992) ⁶ BK50 ersiegelt
Tab. 4: Ubersicht über die Parametrisierung	von Asphalt-, Grün- und H	Hasterflächen.		
--	---	---	---	--
Parameter	Einheit	Asphalt	Grünflächen	Pflaster
Einzugsgebiet ¹	E	0/1	0/1	0/1
Höhenmodell ²	[m]	Höhenraster	Höhenraster	Höhenraster
Gefälle ¹	[%]	GIS	GIS	GIS
Fließzeit OA zum Auslass ⁴	[min]	t=s/v _m ; k _{st} =80	t=s/v _m ; k _{st} =20	t=s/v _m ; k _{st} =75
Fließzeit ZA zum Auslass	[min]		·	·
Fließzeit Matrix ⁵	[min]		*,	·
Bodenart ⁶	Ξ	-(13) ⁹	13	13
nFK ⁷	[mm]	150	150	150
Freie nFK vor Ereignis ⁷	[mm]	(150 / 75 / 0) ⁹	150 / 75 / 0	150 / 75 / 0
Freie LK vor Ereignis ⁷	[mm]	200	200	200
Effektives Porenvolumen ⁷	[mm]	350	350	350
Gesättigte Hydraulische Leitfähigkeit (k_s)	[mm/h]	22	22	22
Bodenmächtigkeit ³	[cm]	100	100	100
Grad der Versiegelung ³	[%]	100	0	60
Tiefenperkolation ³	[mm/h]	22	22	22
Trockenrisstiefe	[cm]	0	0	0
Markoporendichte vertikale MP	[/m²]	0	100	0
Markoporenlänge vertikale MP	[cm]	0	30	0
Markoporendichte horizontale MP	[/m²]	0	125	0
¹ GIS (1=Teil des EZG) ² manuell definiert und Produktdatenblätter * kein Routing des Matrixflu	interpoliert ³ Annahme ⁴ Jsses, weil an der Messst	GMS-Formel: v _m =k _{st} *R ^{2/3} *I ^{1//} elle nur oberflächlicher Abflu	^{2 5} Darcy (Hölting 1992) iss erfasst wurde ⁹ egal, v	⁶ BK50 ⁷ Hölting 1992 / veil versiegelt

| 23

3.3.2 Niederschlags- und Abflussdaten

Als Niederschlagsinput wurden für RoGeR bislang zeitlich variable Rasterdatensätze aus Radarmessungen verwendet. Für die Modellierung des Vauban-Gebiets kamen aufgrund seiner relativ geringen räumlichen Ausdehnung einfache Niederschlagszeitreihen zum Einsatz. Diese stammten von der Klimastation Gerda-Weiler-Straße (Messstation v02) des Evaluationsprojekts und wurden bereits korrigiert (Dynamic Correction Model, Førland et al. 1996). Sowohl Niederschlags- als auch Abflussdaten lagen in minütiger Auflösung vor und wurden auf Zeitschritte von 5 Minuten aggregiert, um der zeitlichen Auflösung des Modells gerecht zu werden. Da in RoGeR noch kein Verdunstungsmodul implementiert ist, wurden lediglich Einzelereignisse simuliert. Bei der Auswahl geeigneter Niederschlagsereignisse wurden anstatt sonst häufig angewandter Dauerstufen die Ereignisse mit den höchsten Niederschlagssummen ausgewählt. Weiter eingeschränkt wurde diese Auswahl durch die Notwendigkeit von zugehörigen Abflussmessungen. Viele geeignete Niederschlagsereignisse mussten verworfen werden, weil der gemessene Dachabfluss den gefallenen Niederschlag übertroffen hat (Abflussbeiwert C > 1) oder zu diesem Zeitpunkt überhaupt kein Abfluss gemessen wurde. Insgesamt hat sich die Messung der Abflüsse der Dachflächen als sehr störungsanfällig erwiesen, besonders vom konventionellen Dach blieben kaum verwertbare Ereignisse übrig. Ansonsten wurde zum einen versucht, für jede Fläche drei Ereignisse unterschiedlicher Intensität zu finden. Zum anderen sollten der Vergleichbarkeit wegen für möglichst alle Flächen die gleichen Events simuliert werden. Für sechs Flächen konnten identische Ereignisse verwendet werden, für die restlichen wurden bestmögliche Alternativen herangezogen (siehe Tab. 5 und Tab. 6).

EZG	Niederschlagsereignis Nr.				
v06	83	85	199		
v27	124	193	209		
v07, v19, v20, v21, v22, v26	113	186	199		

Tab. 5: Die EZGs und die jeweils zur Modellierung verwendeten Niederschlagsereignisse.

Tab. 6:Die zur Modellierung verwendeten Niederschlagsereignisse sowie deren Summe, Dauer und
Intensität.

Ereignis	83	85	113	124	186	193	199	209
Summe [mm]	19.7	18.0	24.3	11.8	26.0	23.7	19.3	3.1
Dauer [h]	13	25	15	11	21	5	3	5
Intensität [mm/h]	1.5	0.72	1.62	1.07	1.24	4.74	6.43	0.62

3.4 Modellierung

Die eigentliche Modellierung erfolgte mit einer ausführbaren Datei (.exe) des in der Programmiersprache Python verfassten Programms RoGeR. Die zuvor im GIS erstellten Rasterdatensätze aller Eingangsdaten wurden im Floating Binary Format (.flt) gespeichert und dem Programm, wie auch die Niederschlagszeitreihe, über eine Steuerdatei übergeben. Vom Output des Modells wurde die Textdatei (.txt) mit Gesamtabfluss und Abflusskomponenten verwendet und mit R Studio (R Core Team 2015) grafisch aufbereitet.

3.5 Validierung

Zur Bewertung der Modellgüte d.h. der Übereinstimmung von simuliertem und beobachtetem Abfluss wurden verschiedene Kriterien herangezogen. Zunächst wurde rein visuell beurteilt, wie exakt der gemessene Abfluss vom Modell reproduziert wird. Um dem subjektiven Eindruck eine mathematische Größe gegenüberzustellen, wurde die Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE; Nash und Sutcliffe 1970) berechnet. Obwohl sie als Gütemaß durchaus Schwächen aufweist (Gupta et al. 2009), sollte sie als einfache Vergleichsgröße herangezogen werden. Die Berechnung erfolgte mit dem in R implementierten Paket hydroGOF (Zambrano-Bigiarini 2014) gemäß der Formel

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T} (Q_{obs}^{t} - Q_{sim}^{t})^{2}}{\sum_{t=1}^{T} (Q_{obs}^{t} - \overline{Q_{obs}})^{2}}$$
(4)

$$Q_{obs}^t$$
beobachteter Abfluss zum Zeitpunkt t [mm] Q_{sim}^t simulierter Abfluss zum Zeitpunkt t [mm] $\overline{Q_{obs}}$ Mittelwert des beobachteten Abflusses [mm]

Demnach ist die NSE eine dimensionslose Größe. Eine NSE von 1 bedeutet eine perfekte Übereinstimmung von beobachtetem und simuliertem Abfluss. Eine NSE von 0 steht für eine Modellvorhersage so genau wie der Mittelwert, während alles kleiner 0 einer Vorhersage schlechter dem Mittelwert entspricht. In dieser Arbeit wurde ein Wert von 0.6 oder größer als gutes Abbild der Realität angesehen. Für eine Bewertung der Quantität des simulierten Abflusses gegenüber der Beobachtung wurden jeweils wie folgt die Abflusskoeffizienten C_{obs} und C_{sim} berechnet:

$$C_{obs/sims} = \frac{\sum_{t=1}^{T} (Q_{obs/sim}^t)}{\sum_{t=1}^{T} (NS_{obs}^t)}$$
(5)

 $C_{obs/sims}$ Abflusskoeffizient C_{obs} bzw. C_{sim} [-] $Q^t_{obs/sim}$ beobachteter/simulierter Abfluss zum Zeitpunkt t [mm] NS^t_{obs} beobachteter Niederschlag zum Zeitpunkt t [mm]

4 Ergebnisse

4.1 Dachflächen

4.1.1 Kiesdach

Die Modellierung für die kiesbedeckte Dachfläche der Messstelle v06 zeigt insgesamt gute Annäherungen an die beobachteten Ganglinien (siehe Abb. 10). Für das **Niederschlagsereignis 85** (geringste Intensität auf dieser Fläche) gibt das mittlere Szenario gegen Mitte/Ende der Zeitreihe annähernd das beobachtete Abflussgeschehen wieder. Zu Beginn des Ereignisses generiert das Modell aber zu wenig Abflussmenge, während am Ende ein Ausschlag zu viel simuliert wird. Es resultiert ein C_{obs} von 0.93 sowie ein C_{sim} von 0.94, die NSE beträgt 0.49. Insgesamt spiegelt der Modelllauf mit hoher Vorfeuchte und maximalem k_s-Wert den gemessenen Abfluss am besten wieder, sowohl die Dynamik als auch die absolute Menge stimmen sehr gut überein. Die Kurve des Minimalszenarios gibt das Abflussgeschehen hingegen kaum wieder, hier passen Quantität und Dynamik nicht zusammen.

Das **Niederschlagsereignis 83** ist von mittlerer Intensität und verursacht zwei größere Abflussspitzen. Die Erste wird am besten vom Maximalszenario erfasst, obwohl sie etwas zu breit ausfällt. Die Zweite wird bezüglich der Quantität von keinem Szenario korrekt wiedergegeben, obwohl das zeitliche Auftreten der Doppelspitze des HOA bei allen Szenarien passt. Direkt anschließend folgt der Abfluss aus der Matrix, der je nach Modelllauf unterschiedlich stark verzögert auftritt, jedoch in keinem Fall der Realität entspricht. Im Bereich zwischen den Peaks verlaufen alle Szenarien sehr ähnlich und nahe an der beobachteten Abflussganglinie. Anhand der erhobenen Parameter entspricht die Summe des modellierten Abflusses annähernd der des beobachteten (C_{obs} =0.91; C_{sim} =0.95), die Übereinstimmung der beiden Ganglinien fällt aber eher schlecht aus (NSE=0.3).

Die höchste Intensität liefert **Ereignis 199**, hier fallen maximal rund 3 Millimeter Niederschlag in 5 Minuten. Die scharfe Abflussspitze zu Beginn wird dabei von allen Szenarien unzureichend getroffen. Sie besteht im Modell fast ausschließlich aus HOA, weshalb die Unterschiede zwischen den Modellläufen gering ausfallen. Im weiteren Verlauf liegt das Maximalszenario am nächsten an der beobachteten Abflussganglinie, das mittlere glättet das Abfluss-



Abb. 10: Messstelle v06, Kiesdach. Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss sowie den beitragenden Abflusskomponenten für drei Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität. Der Abflussbeiwert C_{sim}, die NSE und die Abflusskomponenten beziehen sich auf das mittlere Szenario.

geschehen stärker und dem Minimalszenario fehlt es an Quantität. Der Abflusskoeffizient C_{obs} der gemessenen Ganglinie beträgt 1.08, C_{sim} der Simulation 0.89. Trotz guter Anpassung im hinteren Bereich ist die NSE niedrig (0.26).

4.1.2 Extensive Dachbegrünung

Die Modellläufe für die extensive Dachbegrünung von Messstelle v07 zeigen insgesamt eine mittelmäßige Übereinstimmung mit den beobachteten Abflussganglinien. Für das **Nieder-schlagsereignis 113** liefert der Modelllauf mit maximaler Vorfeuchte und maximalem k_s -Wert augenscheinlich die beste Anpassung, obgleich die Ganglinie am Anfang zu steil ansteigt und am Ende zu schnell abfällt (Abb. 11). Die Zeitpunkte der Spitzenabflüsse sind besser getroffen als beim mittleren Szenario, das anfangs zu flach verläuft und die zweite Spitze nicht voll ausgeprägt abbildet. Das Minimalszenario gibt lediglich den oberflächlichen Abflussanteil wieder und bringt somit zu wenig Abflussmenge. Während der gemessene Abfluss annähernd dem Gesamtniederschlag entspricht ($C_{obs}=0.97$) fällt der simulierte Abfluss im mittleren Szenario 30 Prozent geringer aus ($C_{sim}=0.67$). Die NSE beträgt 0.34.

Die Ganglinie zu **Ereignis 186** besteht während der ersten drei bis vier Stunden nach Ereignisbeginn vollständig aus Oberflächenabfluss (mittleres Szenario) und entspricht damit ziemlich genau dem beobachteten Abfluss. Mit einsetzendem Matrixabfluss weicht die Simulation mengenmäßig ab, behält aber ihre gute Dynamik. Das Maximalszenario weicht von Anfang an sehr stark ab, gibt die beobachtete Ganglinie aber ab circa der Mitte der Zeitreihe genauso gut wieder wie das mittlere Szenario. Der Abflussbeiwert des mittleren Szenarios ist größer als der des beobachteten ($C_{obs}=0.39$; $C_{sim}=0.68$). Die NSE fällt negativ aus (-3.6).

Für das Event mit der höchsten Intensität (**199**) zeigt keine der drei Modellvarianten ein wirklich zufriedenstellendes Ergebnis, obwohl die gesamte Abflusssumme von der mittleren Simulation gut getroffen wird (C_{obs} =0.59; C_{sim} =0.52). Alle simulieren den ersten Peak ähnlich, jedoch verglichen mit der Beobachtung etwas kleiner und mit einem Zeitschritt Verzögerung. Danach fallen die Simulationen zu hoch oder zu niedrig aus oder das Timing stimmt nicht überein. Die NSE bleibt dementsprechend niedrig (0.12).

4.1.3 Intensive Dachbegrünung

Abb. 12 zeigt die Modellierungen der intensiv begrünten Dachfläche. Für die **Ereignisse 113 und 186** liefert jeweils das mittlere Szenario eine sehr gute Annäherung an den beobachteten Abfluss, bestätigt durch eine NSE von 0.87 bzw. 0.79.



Abb. 11: Messstelle v07, extensive Dachbegrünung. Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss sowie den beitragenden Abflusskomponenten für drei Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität. Der Abflussbeiwert C_{sim}, die NSE und die Abflusskomponenten beziehen sich auf das mittlere Szenario. Für das **Event 113** sind beide Abflusskoeffizienten identisch ($C_{obs}/C_{sim}=0.67$), für das **Event 186** betragen sie 0.87 (C_{obs}) bzw. 0.70 (C_{sim}). Die Maximalszenarios der beiden Ereignisse liegen zu Beginn jeweils zu hoch, nähern sich im weiteren Verlauf jedoch den Kurven von mittlerem Szenario und beobachteten Abfluss an.

Wie schon bei der extensiv begrünten Dachfläche funktioniert die Modellierung des **Ereignisses 199** auch hier eher mäßig, allerdings wird die Abflussspitze in diesem Fall von allen Modellläufen überschätzt. Die Übereinstimmung von Modellergebnissen und beobachteter Ganglinie im weiteren Verlauf ist schlecht, das zeigt auch die NSE von -0.53. Die Abflussbeiwerte für den beobachteten Zeitraum liegen bei 0.52 für die gemessene und 0.61 für die mittlere modellierte Ganglinie.

4.1.4 Konventionelle Dachfläche

Die Modellergebnisse der versiegelten Dachfläche (Messstelle v27) entsprechen relativ exakt dem Verlauf des Niederschlags-Inputs, mangels durchflossener Bodenmatrix mit nur leichter Verzögerung der jeweiligen Spitzen (Abb. 13). Die Abflussbeiwerte der simulierten Ganglinien betragen demnach immer 1.0, d.h. 100 Prozent Abfluss des Niederschlags ohne Rückhalt. Für das **Niederschlagsereignis 124** zeigt sich eine mäßige Übereinstimmung von beobachteter und modellierter Ganglinie in der ersten Hälfte der Zeitreihe. Ab ca. 21.30 Uhr fällt der beobachtete Abfluss stark ab, während der modellierte weiterhin der Niederschlagsdynamik folgt. Der Abflussbeiwert C_{obs} liegt bei 0.71, die NSE beträgt -0.74.

Die Abflussreaktion von **Ereignis 193** wird bezüglich der Dynamik gut wiedergegeben, die Simulation bleibt mengenmäßig aber bis auf die Abflussspitze immer etwas unter dem beobachteten Verlauf. Die NSE beträgt 0.16, der Koeffizient des gemessenen Abflusses liegt bei 1.29.

Das mit rund 3 Millimetern geringste **Niederschlagsereignis 209** wird nahe an der Realität abgebildet, die NSE von 0.59 unterstreicht dies. Die Abflussbeiwerte sind identisch und belegen das Abfließen des gesamten gefallenen Niederschlags.



Abb. 12: Messstelle v26, intensive Dachbegrünung. Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss sowie den beitragenden Abflusskomponenten für drei Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität. Der Abflussbeiwert C_{sim}, die NSE und die Abflusskomponenten beziehen sich auf das mittlere Szenario.



Abb. 13: Messstelle v27, konventionelles Dach (Eternit). Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss für drei Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität.

4.2 Gully-Einzugsgebiete

4.2.1 Messstelle v19

Die Simulation von **Niederschlagsereignis 113** vom 7. November 2010 zeigt für das EZG der Gully-Messstelle v19 eine Überschätzung des Abflusses über den gesamten beobachteten Zeitraum (Abb. 14). Die Dynamik des Abflusses wird vom Modell korrekt abgebildet, die Kurve wirkt aber wie parallel nach oben verschoben. Am Anfang wird in der Simulation eine Abflusspitze gebildet, die in der Realität nicht existiert. Der Abflussbeiwert der Modellierung ist doppelt so hoch wie der des gemessenen Abflusses ($C_{obs}=0.28$; $C_{sim}=0.59$), die NSE beträgt -1.6.

Für das **Niederschlagsereignis 186** zeigt sich ein ähnliches Bild, auch hier liegt der simulierte Abfluss bei weitestgehender Übereinstimmung der Abflussdynamik nahezu durchgehend über dem beobachteten. Die Abflussbeiwerte sind ebenfalls fast identisch mit Ereignis 113 ($C_{obs}=0.3$; $C_{sim}=0.59$), die NSE minimal besser (-0.14).

Das **Niederschlagsevent 199** wird von den Dreien am besten getroffen. Auch wenn die simulierte Abflussspitze kürzer und breiter ausfällt, sind die Abflussbeiwerte nahezu identisch $(C_{obs}=0.58; C_{sim}=0.59)$, die NSE fällt trotzdem gering aus (0.28).

4.2.2 Messstelle v20

Im EZG von Messstation v20 gibt das Maximalszenario die beobachtete Abflussreaktion auf das **Ereignis 113** über weite Bereiche exakt wieder (Abb. 15). Die mittlere Parameterkombination zeigt teilweise Übereinstimmungen mit der Beobachtung, zwischen 8 und 15 Uhr fällt der Abfluss allerdings zu gering aus. Der spät einsetzende Matrixfluss bedingt am Ende der Zeitreihe eine Ganglinie, die nicht zur Beobachtung passt. Das Minimalszenario zeigt eine gute Dynamik und entspricht in der ersten Hälfte der Zeitreihe dem mittleren Szenario. Zum Erreichen der beobachteten Ganglinie fehlt es aber an Menge. Der mittlere Abflussbeiwert C_{sim} (0.64) fällt geringer aus als der beobachtete C_{obs} (0.89), die NSE beträgt 0.26.

Die Abflussreaktion des **Niederschlagsereignisses 186** wird vom Maximalszenario teilweise stark überschätzt, vom mittleren etwas weniger stark. Bis auf Abweichungen in der Mitte der beobachteten Zeitreihe gibt das mittlere Szenario ein stimmiges Bild ab. Zu Beginn der Zeitreihe, wo der Abfluss vollständig aus HOA gebildet wird, ist es identisch mit dem Minimalszenario. Im weiteren Verlauf fehlt es diesem jedoch an Abflussvolumen. Die NSE fällt mit

-1.46 schlecht aus, der simulierte Abflusskoeffizient ist durch die Überschätzung zu hoch $(C_{obs}=0.43; C_{sim}=0.65).$

Für **Ereignis 199** fallen alle drei Modellläufe nahezu identisch aus, sie bestehen überwiegend aus Oberflächenabfluss. Die Abflussspitze ist etwas stärker verzögert als die der gemessenen Ganglinie und fällt geringer aus. Im weiteren Verlauf stimmen die Ganglinien gut überein. Die Abflussbeiwerte bestätigen dieses Bild ($C_{obs}=0.28$; $C_{sim}=0.34$), die NSE (-0.04) nicht.



Abb. 14: Messstelle v19, Gulli-Einzugsgebiet. Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss für drei Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität.



Abb. 15: Messstelle v20, Gully-EZG. Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss sowie den beitragenden Abflusskomponenten für drei Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität. Der Abflussbeiwert C_{sim}, die NSE und die Abflusskomponenten beziehen sich auf das mittlere Szenario.

4.2.3 Messstelle v21

Das Modellergebnis für **Ereignis 113** wurde im Nachhinein verworfen, weil der Wasserstand im Schacht offensichtlich nicht korrekt erfasst wurde und der Abfluss deshalb unglaubwürdig gering ausgefallen war.

Die Modellierung von **Niederschlagsereignis 186** liefert ein Ergebnis, das dem von Messstelle v19 während desselben Events ähnelt. Die Simulation bleibt sehr nah am Niederschlagsinput, was dazu führt, dass der Abfluss im ersten Drittel der Zeitreihe bei guter Abflussdynamik überschätzt wird. Die restliche Zeit findet tendenziell eine Unterschätzung statt, insgesamt resultiert trotzdem ein C_{sim} der größer als C_{obs} ausfällt (0.82 zu 0.59). Die einzelnen Niederschlagsspitzen werden exakt nachgebildet, während der beobachtete Abfluss eine glattere, durchgehende Ganglinie aufweist. Die NSE fällt mit -2.17 schlecht aus.

Zeigt die Simulation des **Events 199** sonst eher eine Unterschätzung des beobachteten Abflusses wird die Menge hier überschätzt, die Spitze ist um einen Zeitschritt (5 Minuten) verzögert. Der weitere Verlauf wird realitätsnah wiedergegeben, trotzdem ist die NSE kleiner Null (-0.61). Die gesamte Abflussmenge wird vom Modell überschätzt ($C_{obs}=0.57$; $C_{sim}=0.82$).

4.2.4 Messstelle v22

Das mittlere Szenario überschätzt die Abflussreaktion von Niederschlagsereignis 113 stellenweise leicht, wirkt insgesamt aber stimmig. Die Abflussbeiwerte sowie die NSE unterstreichen dieses Bild (C_{obs} =0.58; C_{sim} =0.67; NSE=0.64). Das Maximalszenario überschätzt die Abflussmenge etwas stärker, das Minimalszenario ähnelt den mittleren Parameterannahmen, allerdings mit zu schneller Rezession am Ende. Die Abflussdynamik stimmt bei allen gut überein.

Für das **Ereignis 186** liegen alle drei Modellläufe sehr eng beieinander und über der Beobachtung. Die gemessene Abflussganglinie fällt trotz anhaltendem Niederschlag nach einem Drittel der Zeitreihe auf 0, die Simulationen produzieren weiter Abfluss. Die Beobachtung fällt somit insgesamt deutlich kürzer und geringer aus als die Modellläufe, was sich in stark unterschiedlichen Abflussbeiwerten (C_{obs} =0.16; C_{sim} =0.67) und einer schlechten NSE (-4.73) ausdrückt.

Auch beim **Ereignis 199** (höchste Intensität) liegen die Modellläufe eng beieinander, da der Abfluss weitestgehend aus oberflächlichem Abfluss stammt. Der gemessene Abfluss fällt sehr gering aus, der Abflussbeiwert beträgt lediglich 0.08 (C_{sim} =0.55). Die Dynamik der gemesse-

nen und simulierten Ganglinien stimmt überein, quantitativ ist der Unterschied allerdings groß. Dementsprechend gering ist die NSE (-12.1).



Abb. 16: Messstelle v21, Gully-EZG. Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss für drei Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität.



Abb. 17: Messstelle v22, Gully-EZG. Darstellung von Niederschlag, gemessenem und simulierten Abfluss sowie den beitragenden Abflusskomponenten für drei Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensität. Der Abflussbeiwert C_{sim}, die NSE und die Abflusskomponenten beziehen sich auf das mittlere Szenario.

4.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Nur für die mittleren Szenarien bzw. die einzigen Modellläufe der versiegelten EZGs wurden jeweils Abflusskomponenten und die NSE berechnet. Für 4 der 23 modellierten Niederschlagsevents ergibt sich eine NSE von knapp 0.6 oder höher, d.h. es handelt sich nominal um eine gute Abbildung der gemessenen Abflussganglinie. Bei 9 Modellläufen stimmen die Abflusskoeffizienten mit der Beobachtung annähernd überein, wonach zumindest die gesamte modellierte Abflussmenge der Beobachtung entspricht, wenn auch nicht der genaue zeitliche Verlauf.

Subjektiv bewertet liefern allerdings noch andere Modellläufe ein zufriedenstellendes Ergebnis. Besonders gute Simulationen der Dachflächen lieferten das Maximalszenario für Ereignis 85 auf Kies (v06), das mittlere und maximale Szenario für Ereignis 113 auf der extensiven Dachfläche (v07) sowie die mittleren Szenarien der Ereignisse 113 und 186 auf der intensiven Dachfläche. Beim konventionellen Dach zeigten die Modellierungen der Ereignisse 193 und 209 eine gute Annäherung an die gemessenen Abflüsse.

Bei den Gully-EZGs repräsentieren das Maximalszenario für Ereignis 113 der Messstelle v20 und das mittlere Szenario für Ereignis 113 der Messstelle v22 die Realität am besten.

Von den 15 modellierten Events mit unterschiedlichen Szenarien lag in 7 Fällen das mittlere Szenario am nächsten an der Beobachtung, 4-mal das Maximum und 1-mal das Minimum. Bei 3 Ereignissen lag keines der Szenarien besser als die anderen.

5 Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurden viele verschiedene Modellläufe durchgeführt, um die Eignung von RoGeR für komplexe urbane EZGs am Beispiel des Freiburger Stadtteils Vauban zu testen. Neben prinzipiell soliden Ergebnissen lieferte die durchgeführte Modellierung unter den beschriebenen Rahmenbedingungen aber auch einige Ansatzpunkte für Kritik, welche im Folgenden diskutiert werden.

Modellgüte

Zunächst sei zu erwähnen, dass sich die Modellergebnisse anhand der NSE nur schwer miteinander vergleichen lassen. Zu komplex ist das Zusammenspiel von Abflussmenge und Abflussdynamik. Gerade bei den kurzen und intensiven Ereignissen fällt die berechnete Modellgüte negativ aus, obwohl die beobachtete Abflussganglinie bis auf eine um 5 Minuten verzögerte Abflussspitze gut getroffen wurde (v21/199, v20/199). Auch abschnittsweise gute Übereinstimmungen kommen in der NSE nicht zum Ausdruck. Außerdem wurde die NSE nur für die mittleren Szenarien überhaupt berechnet. Deshalb lässt sich die Qualität der Modellierung am ehesten über die subjektive Wahrnehmung einschätzen. Auch Steinbrich et al. (2016) haben bei der Bewertung ihrer Modellergebnisse bewusst auf die Verwendung eines Gütemaßes verzichtet. Ihrer Meinung nach ermöglicht sowieso keine der verfügbaren Methoden eine realistische Einschätzung der Qualität einer Abflussganglinie.

Die Abflusskoeffizienten bilden dagegen ein einfaches aber solides Bewertungskriterium für die Übereinstimmung von beobachteter und simulierter Abflussganglinie bezüglich der gesamten Abflussmenge.

Parametrisierung

Viele der Parameterwerte mussten für die Dachflächen erst recherchiert oder aus bestehenden Bodenarten abgeleitet werden, die meisten konnten letztendlich aber auf einen Wert festgelegt werden. Für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und die Vorfeuchte wurden jedoch weiterhin Wertebereiche angenommen und diese über die drei verschiedenen Szenarien abgebildet. Indirekt war somit neben der Frage der generellen Eignung des Modells auch zu klären, in welcher Kombination die beiden Parameter eine realistische Simulation ermöglichen.

Das Minimalszenario kann dabei sowohl für Substrat als auch für Kies als unrealistisch ausgeschlossen werden, weil die niedrigen k_s-Werte ein viel zu verzögertes Abflussverhalten aus der Matrix bedingen. Bei den begrünten EZGs trug lediglich der HOA zur Abflussganglinie im betrachteten Zeitraum bei, welche dementsprechend niedrig ausfiel. Bei der mit Kies bedeckten Dachfläche bedingt eine zu niedrige gesättigte hydraulische Leitfähigkeit bei Ereignis 85 einen Matrixabfluss mit zu träger Reaktion auf die Niederschlagsdynamik.

Insgesamt lieferten die k_s-Werte der mittleren bis maximalen Szenarien in Kombination mit verschiedener Vorfeuchte auf Kies wie Substrat die besten Ergebnisse. Der von Stovin (2010) beschriebene Einfluss der Vorfeuchte auf das Rückhalte- bzw. Abflussverhalten spiegelt sich in den Simulationen dabei stark wieder. Während der ks-Wert hauptsächlich die zeitliche Verlagerung des Abflusses (x-Richtung) bedingt, wirkt sich die angenommene Vorfeuchte sehr stark auf die Höhe des Abflusses aus, insbesondere zu Beginn der Ereignisse. Dabei variiert die Vorfeuchte auch beim identischen Niederschlagsereignis zwischen den Flächen, sodass jeweils unterschiedliche Szenarien die beobachtete Ganglinie gut repräsentieren (z.B. v07/113, v26/113 sowie v22/113, v20/113).

Datenqualität

Generell wurde eine seriöse Einschätzung der Modellgüte durch mangelnde Vertrauenswürdigkeit der Validierungsdaten erschwert. Die Messreihen der Dachabflüsse fielen wie erwähnt bereits bei der Suche nach geeigneten Niederschlags-Abflussereignissen mit Abflussbeiwerten teilweise weit jenseits der 100 Prozent auf, insbesondere bei der konventionellen Dachfläche. Zwar wurden ausschließlich Niederschlagsereignisse mit einem glaubwürdigen Abflusskoeffizienten weiterverwendet, die Frage inwieweit diese der Realität entsprechen blieb aber trotzdem bestehen.

Bei den Gully-Einzugsgebieten zeigten sich gewisse Auffälligkeiten erst bei der Betrachtung der Modellergebnisse zusammen mit Niederschlag, beobachtetem Abfluss und dem Vergleich zwischen den verschiedenen EZGs während desselben Ereignisses. Bei Ereignis 186 auf der Untersuchungsfläche v22 wird trotz anhaltendem NS kein Abfluss gebildet. Dabei wirkt es fast so, als wäre die gesamte Abflussganglinie in negative y-Richtung verschoben und nur die größeren Abflüsse wären übrig geblieben. Ähnliche Beobachtungen sind auf der Fläche v19 für die Events 113 und 186 zu machen. Dort wurde die Ursache der Diskrepanz zwischen

beobachtetem und simuliertem Abfluss zunächst in der Parametrisierung der Fläche gesucht. Aber weder ein durchlässigeres Substrat unter dem Pflasterbelag, ein geringerer Versiegelungsgrad des Belags noch die von Andersen et al. (1999), Nemirovsky et al. (2013) und Starke et al. (2010) beschriebenen möglichen Verdunstungseffekte liefern eine insgesamt stimmige Erklärung. Viel wahrscheinlicher sind Fehler bei der Wasserstandmessung in den verschmutzungsanfälligen Einlaufschächten, die sich durch die Umrechnung von Wasserständen in Abflüsse und die durchgeführte Luftdruckkorrektur womöglich noch verstärkt haben könnten. Beim Versuch die Modellergebnisse einzuschätzen blieb somit immer die Frage im Hinterkopf, ob die Daten fehlerhaft sind oder die Simulation. Das bestätigt die unter anderem von Beven (1989) und Steinbrich et al. (2016) angesprochene große Unsicherheit in der Modellierung, die maßgeblich durch die Qualität der Eingangs- und Validierungsdaten mitbestimmt wird

Im Vergleich zu den Abflüssen wurde der Niederschlagsinput als glaubwürdig eingestuft. Lediglich eine stärkere Glättung im Anschluss an die Aggregierung der Daten könnte in Betracht gezogen werden, um den Effekt der Kippwaage bei der Niederschlagsmessung auszugleichen.

Vegetation

Obwohl im Zuge der Modellierung der Dachflächen und Gully-EZGs keine Vorher-Nachher-Szenarien betrachtet wurden, konnten indirekt Hinweise auf eine zeitliche Veränderung der Rückhaltefähigkeiten der Gründächer mit zunehmender Vegetation gefunden werden. Ursprünglich sollten als Spannweite der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_s-Wert) für die begrünten Dächer die Kennwerte der Substrat-Hersteller verwendet werden (Bisotherm GmbH 2013; VulkaTec Riebensahm GmbH 2016; Optigrün international AG 2016). Nachdem die Modellergebnisse selbst mit den laut Produktdatenblättern höchstmöglichen k_s-Werten (30000 mm/h) noch offensichtlich zu träge Abflussreaktionen zeigten, wurde die gesättigte Wasserleitfähigkeit schließlich bis auf das zwölffache des ursprünglichen Maximums angehoben. Die k_s-Werte des Substrats erreichen damit die Größenordnung von Kies. Die Erklärung dafür könnte der Bewuchs durch extensive Vegetation sein. Präferentielle Fließwege entlang der Wurzeln könnten für eine erhöhte Durchlässigkeit verantwortlich sein und damit die von Dunnett et al. (2008b) genannte verminderte Speicherkapazität einer "gealterten" Dachbegrünung bestätigen. Beim nicht begrünten Kiesdach konnte hingegen mit den von (Hölting 1992) genannten k_s-Werten für Kies eine realitätsnahe Abflussreaktion erreicht werden.

Methodik

Der hier verwendete Ansatz mit der Ausformung des Geländes durch manuelle Definition der Höhenpunkte ist über die experimentelle Ebene hinaus für eine routinemäßige Anwendung nicht praktikabel. Für den Einsatz in urbanen Gebieten wäre das Vorhandensein eines detaillierten Höhenmodells von Vorteil, das auch die Gebäude mit einschließt und die Fließwege möglichst realitätsnah beschreibt. Allerdings hat sich auch gezeigt, dass die Fließzeiten auf einer Vielzahl der Flächen des Untersuchungsgebietes so kurz waren, dass Abweichungen vom tatsächlichen Fließweg mitunter nicht zum Tragen kommen.

Aus den verfügbaren Daten konnte selbst mit einer Begehung vor Ort häufig nicht abschließend festgestellt werden, wohin einzelne Dachflächen entwässern und ob sie überhaupt an die Trennkanalisation angebunden sind oder privat zurückgehalten bzw. versickert werden. Bei den Flachdächern konnte durch das Vorhandensein mehrerer Dachrinnen mitunter nicht abschließend festgestellt werden, welche Fläche von der Abflussmessung tatsächlich erfasst wurde. Dementsprechend ist auch die Umrechnung der Abflüsse in Millimeter zur direkten Vergleichbarkeit mit dem NS mit einem potenziellen Fehler behaftet.

Desweiteren wurden die Interzeption sowie die Verdunstung bei der Modellierung nicht berücksichtigt, obwohl diese eine große Rolle spielen können (Jackisch et al. 2013). Die in dieser Arbeit untersuchten Flächen waren aber soweit erkennbar unbeeinflusst von Interzeption durch Baumbestand. Die Verdunstung wiederum kommt bei der kontinuierlichen Simulation eher zum Tragen als bei ereignisbasierter Herangehensweise.

Eignung für komplexe EZGs

Die augenscheinlich besten Ergebnisse auf gering versiegelten Flächen lieferten Modellierungen bei geringer Niederschlagsintensität (v06/85, v07/113, v26/113, v26/186, v20/113, v22/113). Die Ereignisse von hoher Intensität und kurzer Dauer werden dort generell schlechter getroffen. Bis auf die Simulation von v20/199 stimmen entweder die Abflussspitze oder das Tailing nicht überein.

Bei den stärker versiegelten Untersuchungsgebieten, für die jeweils nur ein Szenario modelliert wurde, entzieht sich ein Ereignis der Bewertung (v27/124). Gemäß dem Temperaturverlauf erklärt einsetzender Schneefall die Diskrepanz von beobachteter und simulierter Ganglinie. Das Ereignis v27/193, welches aus Mangel an Alternativen trotz eines Abflussbeiwertes von 1.29 in die Modellierung mit einbezogen wurde trotzdem eine gute Übereinstimmung mit der Beobachtung. Die restlichen Ereignisse zeigen besonders im Bezug auf die Abflussdynamik durchweg positive Ergebnisse, allerdings unter dem Vorbehalt der bereits erwähnten Unsicherheit der gemessenen Abflussganglinie.

Daraus kann geschlossen werden, dass RoGeR die Abflussbildung auf den untersuchten Flächen prinzipiell gleichermaßen gut reproduzieren kann, unabhängig von der jeweiligen Größe (Dächer/Gully-EZGs) oder der Oberfläche (Asphalt, Kiesdach, Gründach etc.).

Allerdings wurde RoGeR in der vorliegenden Arbeit letztlich nur auf einen Teil der Strukturen angewandt, die ein komplexes urbanes EZG ausmachen. Die betrachteten Teilbereiche des Untersuchungsgebiets repräsentieren lediglich einzelne Dächer unterschiedlichen Aufbaus und deren Zusammenspiel mit anderen Oberflächen in einem Wohnanger. Die eigentlich anspruchsvolle Aufgabe ist die Einbeziehung der Mulden-Rigolen-Systeme mit ihrem komplexen Infiltrations- und Exfiltrationsverhalten in Abhängigkeit des Grundwasserstands. Diese blieben hier, eingeschränkt durch den Umfang der Arbeit, außen vor.

6 Fazit und Ausblick

Die Berechnung der NSE um eine Vergleichbarkeit zwischen den Modellergebnissen zu schaffen hat sich auch in dieser Arbeit nicht bewährt. Für weitere Anwendungen kann deshalb vermutlich ganz darauf verzichtet werden. Stattdessen könnte die subjektive Bewertung systematischer angegangen werden.

Die gewählte Parametrisierung ließ insgesamt wenig Zweifel an ihrer Richtigkeit. Für Kiesdächer kann künftig eine gesättigte hydraulische Leitfähigkeit von mindestens 360000 mm/h angenommen werden. Für Flächen mit Gründachsubstrat sind Werte zwischen 200000 und 360000 mm/h wahrscheinlich. Allerdings können diese Werte je nach untersuchter Fläche, verwendetem Substrat und dessen Alter variieren. Ein großer Unsicherheitsfaktor bleibt die Vorfeuchte. Sie nimmt einen großen Einfluss auf das Ergebnis, war in dieser Arbeit allerdings eine unbekannte Eingangsgröße. Die verschiedenen Szenarien im Vergleich mit den beobachteten Ganglinien haben gezeigt, dass sie von quasi Null bis annähernd 100 Prozent rangieren kann und auch beim identischen Ereignis zwischen den Flächen variiert. Hier könnte überprüft werden, inwieweit sich das Modell GWN-BW zur Vorhersage der Vorfeuchte auch für Dachflächen eignet.

Trotz der Vielzahl an Unsicherheiten liefert RoGeR in vielen Fällen realitätsnahe Simulationsergebnisse der Abflussganglinie für die untersuchten Flächen. Demnach kann es außer für weitgehend natürlich belassene Einzugsgebiete auf der Hang- und Mesoskale auch für städtisch geprägte EZGs angewandt werden. Allerdings mit der Beschränkung auf die Strukturen, welche in der vorliegenden Arbeit simuliert wurden.

Der nächste Schritt muss deshalb sein, RoGeR auf den gesamten Stadtteil Vauban anzuwenden, um zu sehen, inwieweit auch die MRS abgebildet werden können oder welche Änderungen in der Modellstruktur dafür nötig sind. Bei einer Ausweitung der Versuchsfläche müssen dann auch wieder die hier vernachlässigten Aspekte der Interzeption durch Baumbestand sowie die Re-Infiltration nach der Abflussbildung in Betracht gezogen werden.

Literaturverzeichnis

- Alley, W.M.; Smith, P.E. (1982a): Distributed Routing Rainfall-Runoff Model Version II.U.S. Geological Survey (Geological Survey Open File Report, 82-344).
- Alley, W.M.; Smith, P.E. (1982b): Multi-Event Urban Runoff Quality Model. U.S. Geological Survey (Geological Survey Open File Report, 82-764).
- Andersen, C.T.; Foster, I.; Pratt; C.J. (1999): The role of urban surfaces (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation: development of a laboratory simulation experiment. *Hydrological Processes* (13), S. 597–609.
- Becknell, B.R.; Imhoff, J.C.; Kittle, J.L.; Donigian, A.S.; Johanson, R.C. (1993): Hydrological simulation program: Fortran. User's manual for release 10. AQUA TERRA Consultants.
- Berg, P.; Moseley, C.; Haerter, J.O. (2013): Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. *Nature Geosci* 6 (3), S. 181–185. DOI: 10.1038/ngeo1731.
- Beven, K. (1989): Changing ideas in hydrology The case of physically-based models. Journal of Hydrology 105 (1-2), S. 157–172. DOI: 10.1016/0022-1694(89)90101-7.
- Beven, K.J.; Clarke, R.T. (1986): On the Variation of Infiltration Into a Homogeneous Soil Matrix Containing a Population of Macropores. *Water Resour. Res.* 22 (3), S. 383–388. DOI: 10.1029/WR022i003p00383.
- Bisotherm GmbH (Hg.) (2013): Produktdatenblatt Bisoroof Gründachsubstrat E. Online verfügbar unter http://www.bisotherm.de/tl_files/DE/downloads/onsite_bisoroof/Bisotherm_Tech-Bisoroof-Gruendachsubstrat-E-04-2013.pdf, zuletzt aktualisiert am 26.04.2013, zuletzt geprüft am 18.10.2016.
- Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. *Freiburger Schriften zur Hydrologie* (Band 11).

- Bremicker, M.; Homagk, P.; Ludwig, K. (2004): Operationelle Niedrigwasservorhersage für das Neckareinzugsgebiet. *Wasserwirtschaft* (7-8).
- Carter, T.; Jackson, C.R. (2007): Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. *Landscape and Urban Planning* 80 (1-2), S. 84–94. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2006.06.005.
- Czemiel Berndtsson, J. (2010): Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality. A review. *Ecological Engineering* 36 (4), S. 351–360. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2009.12.014.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2016): Starkregen. Wetterlexikon. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html, zuletzt geprüft am 21.10.2016.
- Dunnett, N.; Nagase, A.; Booth, R.; Grime, P. (2008b): Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. *Urban Ecosyst* 11 (4), S. 385–398. DOI: 10.1007/s11252-008-0064-9.
- DVWK (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II: Synthese. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) (DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft 113).
- F.A.Z. (2016): Unwetter in Süddeutschland. Wenn sich Geröllmassen durch die Straßen schieben. Frankfurter Allgemeine Zeitung. Online verfügbar unter http://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/unwetter-ueberrollt-braunsbach-in-badenwuerttemberg-14260704.html, zuletzt aktualisiert am 30.05.2016, zuletzt geprüft am 25.11.2016.
- Førland, E.J.; Allerup, P.; Dahlström, B.; Elomaa, E.; Jónsson, T.; Madsen, H. et al. (1996):Manual for operational correction of nordic precipitation data. *DNMI klima* (24).
- Frey, W. (2013): Freiburg, Green City. Wege zu einer nachhaltigen Stadtentwicklung. 2., überarb. Aufl. Freiburg im Breisgau: Herder.
- Getter, K.L.; Rowe, D.B. (2006): The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. *HortScience* 41 (5), S. 1276–1285.
- Getter, K.L.; Rowe, D.B.; Andresen, J.A. (2007): Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering* 31 (4), S. 225–231. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2007.06.004.

- Göbel, P.; Coldewey, W.G.; Dierkes, C.; Kories, H.; Meßer, J.; Meißner, E. (2007): Impacts of green roofs and rain water use on the water balance and groundwater levels in urban areas. *Grundwasser* 12 (3), S. 189–200. DOI: 10.1007/s00767-007-0032-y.
- Green, W.H.; Ampt, G.A. (1911): Studies in soil physics. The flow of air and water through soils. *Journal of Agriculture Science* (4), S. 1–24.
- Gudera, T.; Morhard, A. (2015): Hoch aufgelöste Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung mit GWN-BW. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 59 (5), S. 205–216.
- Gupta, H.V.; Kling, H.; Yilmaz, K.K.; Martinez, G.F. (2009): Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria. Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377 (1-2), S. 80–91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.
- Gurtz, J.; Zappa, M.; Jasper, K.; Lang, H.; Verbunt, M.; Badoux, A.; Vitvar, T. (2003): A comparative study in modelling runoff and its components in two mountainous catchments. *Hydrol. Process.* 17 (2), S. 297–311. DOI: 10.1002/hyp.1125.
- Haberlandt, U. (2016): Niederschlag. In: Nicola Fohrer, Helge Bormann, Konrad Miegel,Markus Casper, Axel Bronstert, Andreas Schumann und Markus Weiler (Hg.):Hydrologie. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag (UTB basics, 4513), S. 47–67.
- Hölting, B. (1992): Hydrogeologie. Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. 4., überarb. Aufl. Stuttgart: Enke (Enke-Taschenbuch).
- Huber, W.C.; Dickinson, R.E. (1988): Storm Water Management Model, Version 4, User's Manual. US Environmental Protection Agency (Report EPA/600/3-88-001a).
- Huber, W.C.; Heaney, J.P.; Nix, S.J.; Dickinson, R.E.; Polmann, D.J. (1984): Storm Water Management Model, User's Manual, Version III. US Environmental Protection Agency (Report EPA/600/2-84-109a).
- Ippisch, O.; Vogel, H.-J.; Bastian, P. (2006): Validity limits for the van Genuchten–Mualem model and implications for parameter estimation and numerical simulation. *Advances in Water Resources* 29 (12), S. 1780–1789. DOI: 10.1016/j.advwatres.2005.12.011.
- Jackisch, N.; Brendt, T.; Weiler, M.; Lange, J. (2013): Evaluierung der Regenwasserbewirtschaftung im Vaubangelände, Freiburg i.Br. - unter besonderer Berücksichtigung

von Gründächern und Vegetation. Professur für Hydrologie der Universität Freiburg; ERNST + CO Beratende Ingenieure GmbH; Regiowasser e.V. Freiburg i.Br.

- Jasper, K.; Gurtz, J.; Lang, H. (2002): Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology* 267 (1-2), S. 40–52. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00138-5.
- Kaiser, M. (2006): Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung als Baustein einer nachhaltigen Siedlungsentwicklung. *Raumforschung und Raumordnung* 64 (2), S. 126–134. DOI: 10.1007/BF03183170.
- Landesschau Aktuell (2016): Überschwemmungen in BW. Heftigstes Hochwasser seit 20 Jahren. SWR. Online verfügbar unter http://www.swr.de/landesschauaktuell/bw/ueberschwemmungen-in-bw-heftigstes-hochwasser-seit-20-jahren/-/id=1622/did=17510128/nid=1622/1t4rfi5/, zuletzt aktualisiert am 30.05.2016, zuletzt geprüft am 25.11.2016.
- LUWG (2006): Bestimmungsschlüssel von hochwasserrelevanten Flächen. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (Bericht Nr. 18).
- Markart, G.; Kohl, B.; Sotier, B.; Schauer, T.; Bunza, G.; Stern, R. (2006): Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes bei Starkregen - Grundzüge und erste Erfahrungen. *Wiener Mitteilungen* (Band 197), S. 159–178.
- Mein, R.G.; Larson, C.L. (1973): Modelling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research* 9 (2), S. 384–394.
- Mentens, J.; Raes, D.; Hermy, M. (2006): Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* 77 (3), S. 217–226. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2005.02.010.
- Merz, R. (2006): Regionalisierung von Ereigniskenngrößen. *Wiener Mitteilungen* (Band 197), S. 179–194.
- Monterusso, M.A.; Rowe, D.B.; Rugh, C.L.; Russell, D.K. (2004): Runoff water quantity and quality from greenroof systems. *Acta Hortic*. (639), S. 369–376. DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.639.49.

- Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3), S. 282–290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Nemirovsky, E.M.; Welker, A.L.; Lee, R. (2013): Quantifying Evaporation from Pervious Concrete Systems. Methodology and Hydrologic Perspective. J. Irrig. Drain Eng. 139 (4), S. 271–277. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000541.
- Optigrün international AG (Hg.) (2016): Datenblatt Extensiv-Einschichtsubstrat Typ M. Online verfügbar unter https://www.optigruen.de/fileadmin/contents/Datenblaetter/Optigruen_Datenblaett er/04_Substrate/Optigruen-Extensiv_Einschichtsubstrat-Typ_M-DE.pdf, zuletzt aktualisiert am 07.09.2016, zuletzt geprüft am 18.10.2016.
- Peschke, G. (1985): Zur Bildung und Berechnung von Regenabfluss. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 34 (4), S. 195–200.
- R Core Team (2015): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Online verfügbar unter https://www.R-project.org/, zu-letzt geprüft am 28.11.2016.
- Rauthe, M.; Malitz, G.; Gratzki, A.; Becker, A. (2014): Starkniederschlag. In: Paul Becker und Reinhard F. Hüttl (Hg.): Forschungsfeld Naturgefahren. Offenbach: DWD (DWD/GFZ-Publikation), S. 24–33. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/naturgefahrenforschung/downloads/forschung sfeld_naturgefahrens_starkniederschlag.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 21.10.2016.
- Regierungspräsidium Freiburg Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (2015): GeoFachdaten Baden-Württemberg - Bodenkarte - Hydrogeologie.
- Rößler, O.; Löffler, J. (2010): Potentials and limitations of modelling spatio-temporal patterns of soil moisture in a high mountain catchment using WaSiM-ETH. *Hydrol. Process.*, n/a-n/a. DOI: 10.1002/hyp.7663.
- Schulla, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Dissertation. ETH Zürich.

- Stadt Freiburg i.Br. (Hg.) (2014): Internetpräsenz der Stadt Freiburg i.Br. Online verfügbar unter http://www.freiburg.de/pb/,Lde/208732.html, zuletzt aktualisiert am 21.11.2014, zuletzt geprüft am 15.06.2016.
- Starke, P.; Göbel, P.; Coldewey, W.G. (2010): Urban evaporation rates for water-permeable pavements. Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research 62 (5), S. 1161–1169. DOI: 10.2166/wst.2010.390.
- Statistisches Bundesamt (2014): Umweltnutzung und Wirtschaft. Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter www.destatis.de, zuletzt geprüft am 14.10.2016.
- Steinbrich, A.; Leistert, H.; Weiler, M. (2016): Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. *Environ Earth Sci* 75 (21). DOI: 10.1007/s12665-016-6234-9.
- Steinbrich, A.; Weiler, M. (2012): Abflussbildung und Abflusskomponenten (Atlastafel 6.5). In: Ministerium f
 ür Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-W
 ürttemberg und Landesanstalt f
 ür Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-W
 ürttemberg (Hg.): Wasser- und Bodenatlas Baden-W
 ürttemberg, 4. Lieferung 2012. 4. Lieferung.
- Stovin, V. (2010): The potential of green roofs to manage Urban Stormwater. *Water and Environment Journal* 24 (3), S. 192–199. DOI: 10.1111/j.1747-6593.2009.00174.x.
- Tagesschau (2016): Unwetter in Deutschland. Aufräumen nach der Katastrophe. ARD. Online verfügbar unter https://www.tagesschau.de/inland/unwetter-355.html, zuletzt ak-tualisiert am 30.05.2016, zuletzt geprüft am 25.11.2016.
- Trenberth, K.E. (2011): Changes in precipitation with climate change. *Clim. Res.* 47 (1), S. 123–138. DOI: 10.3354/cr00953.
- VanWoert, N.D.; Rowe, D.B.; Andresen, J.A.; Rugh, C.L.; Fernandez, R.T.; Xiao, L. (2005):
 Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of environmental quality* 34 (3), S. 1036–1044. DOI: 10.2134/jeq2004.0364.
- Verbunt, M.; Gurtz, J.; Jasper, K.; Lang, H.; Warmerdam, P.; Zappa, M. (2003): The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed mode-

ling. Journal of Hydrology 282 (1-4), S. 36–55. DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00251-8.

- VulkaTec Riebensahm GmbH (Hg.) (2016): Datenblatt Dachbegrünung. Online verfügbar unter http://www.vulkatec.de/images/Datenblaetter/Datenblatt_Dach_V3_web.pdf, zuletzt aktualisiert am 03/2016, zuletzt geprüft am 18.10.2016.
- Wagener, T.; Wheater, H.; Gupta, H. V. (2004): Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. London, Singapore: Imperial College Press.
- Weiler, M. (2005): An infiltration model based on flow variability in macropores. Development, sensitivity analysis and applications. *Journal of Hydrology* 310 (1-4), S. 294–315. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.01.010.
- Weiler, M. (2016): Einfluss von Landnutzung und Landbedeckung auf den Wasserkreislauf.
 In: Nicola Fohrer, Helge Bormann, Konrad Miegel, Markus Casper, Axel Bronstert, Andreas Schumann und Markus Weiler (Hg.): Hydrologie. 1. Auflage.
 Bern: Haupt Verlag (UTB basics, 4513), S. 179–190.
- Weiler, M.; Flühler, H. (2004): Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. *Geoderma* 120 (1-2), S. 137–153. DOI: 10.1016/j.geoderma.2003.08.014.
- Weiler, M.; Naef, F.; Leibundgut, C. (1998): Study of runoff generation on hillslopes using tracer experiments and a physically-based numerical hillslope model. *Hydrology*, *Water Resources and Ecology in Headwaters* (248), S. 353–362.
- Wessolek, G.; Kaupenjohann, M.; Renger, M. (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. *Bodenökologie und Bodengenese* (Heft 40).
- Zambrano-Bigiarini, M. (2014): hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series. Online verfügbar unter http://CRAN.R-project.org/package=hydroGOF.
- Zoppou, C. (2001): Review of urban storm water models. *Environmental Modelling & Software* 16 (3), S. 195–231. DOI: 10.1016/S1364-8152(00)00084-0.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
BID	Identifikationsnummer der Bodenart
BK50	Bodenkarte 1:50000
BW	Baden-Württemberg
bzw.	beziehungsweise
bzgl.	bezüglich
C _{obs}	Abflusskoeffizient des beobachteten Abflusses [-]
C _{obs/sims}	Abflusskoeffizient Cobs bzw. Csim [-]
C _{sim}	Abflusskoeffizient des simulierten Abflusses [-]
d.h.	das heißt
evtl.	eventuell
EZG(s)	Einzugsgebiet(e)
fnFK	freie nutzbare Feldkapazität
GIS	Geographisches Informationssystem
ggf.	gegebenenfalls
НОА	Hortonscher Oberflächenabfluss
HVZ	Hochwasservorhersagezentrale
Ι	Fließgefälle [m/m
k _s	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/s]
k _{St}	Rauheitsbeiwert nach Strickler [m ^{1/3} /s]
LK	Luftkapazität, drainierbares Porenvolumen
Matrix-Inf	Infiltration in die Bodenmatrix
Matrix-ZA	Zwischenabfluss durch die Matrix
MP	Makroporen
MP-Inf	Infiltration durch Makroporen
MP-ZA	Zwischenabfluss durch Makroporen
MRS	Mulden-Rigolen-System
nFK	nutzbare Feldkapazität
NS	Niederschlag

NS _{ges}	Niederschlagssumme über den betrachteten Zeitraum
NS ^t _{obs}	beobachteter Niederschlag zum Zeitpunkt t [mm]
NSE	Nash-Sutcliffe-Efficiency [-]
Q_{obs}^t	beobachteter Abfluss zum Zeitpunkt t [mm]
$\overline{Q_{obs}}$	Mittelwert des beobachteten Abflusses [mm]
$Q_{obs/sim}^{t}$	beobachteter/simulierter Abfluss zum Zeitpunkt t [mm]
Q_{sim}^t	simulierter Abfluss zum Zeitpunkt t [mm]
R	hydraulischer Radius [m]
RWB	dezentrale Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen
S	Fließlänge zum tiefsten Punkt [m]
SFA	Sättigungsflächenabfluss
SuV	Siedlungs- und Verkehrsfläche
t	Fließzeit [s]
ТР	Tiefenperkolation
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter
vgl.	vergleiche
v	Fließ-/Filtergeschwindigkeit (v_m bzw. v_f) [m/s]
V _f	Filtergeschwindigkeit [m/s]
v _m	oberflächliche Fließgeschwindigkeit [m/s]
ZA	Zwischenabfluss
Ehrenwörtliche Erklärung

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

Freiburg, den 29. November 2016

Kai Schmidt