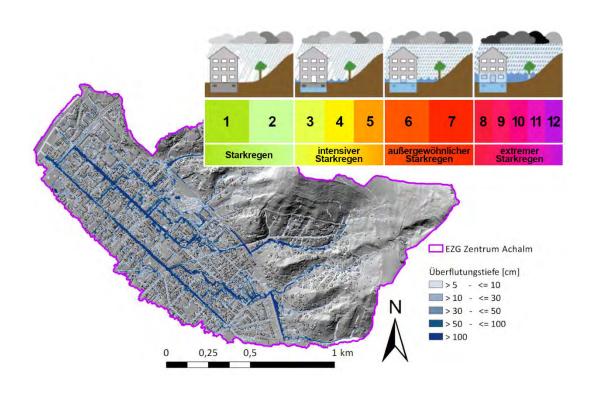
Professur für Hydrologie

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Elina Grohe

Pluvialer und hydraulischer Index im Kontext von Starkregen und Starkregengefahrenkarten



Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg i. Br., Oktober 2019

Professur für Hydrologie

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Elina Grohe

Pluvialer und hydraulischer Index im Kontext von Starkregen und Starkregengefahrenkarten

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler

Korreferent: JProf. Dr. Andreas Hartmann

Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler Freiburg i. Br., Oktober 2019

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Weiler, der sich der Betreuung dieser Arbeit eines eigens gewählten Themas annahm, diesem einen Rahmen gab und stets Rat wusste. Ebenso danke ich Herrn JProf. Dr. Andreas Hartmann für die Zweitbetreuung.

Besonderer Dank gilt Herrn Torsten Müller und Frau Anne Schüller aus dem Fachgebiet Gewässer und Hochwasserschutz der Stadtentwässerung Reutlingen. Zum einen, da der Anstoß eine Masterarbeit zu diesem Thema auszuarbeiten von ihnen kam und zum anderen und weitaus wichtigeren Teil, sie mich mit der Bereitstellung von Material und als wichtige Diskussionspartner sehr unterstützt haben.

Vielen Dank an Herrn Andreas Steinbrich und Herrn Hannes Leistert, die RoGeR Experten, für die Einweisung und Unterstützung. Herzlichen Dank an Herrn Dr. Andreas Hänsler für Anregungen zum Thema SRI.

Vielen Dank an den besten Onkel der Welt für die kulinarischen Auszeiten, meine Tanzschule AYA für die Energie-Boosts und meine Bürokollegen für die Unterhaltung, Diskussionen und Mittagspausen.

Ein doppelt- und dreifacher Dank geht an meine tollen Freunde für deren Unterstützung in jeglicher Hinsicht. Besonderer Dank gebührt Anja H., Tabea P., Gilles L., Jonas K., Johanna G., Moritz I., Antonia H. und Marc D., die mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Last but not least danke ich meinen Eltern und Schwestern, die mich meine gesamte Studienzeit über unterstützt haben. Ihr seid unbezahlbar!

Inhaltsverzeichnis

Ab	bilduı	ngsverz	zeichnis	. IV
Ta	bellen	verzeio	chnis	VIII
Zu	samm	enfassı	ung	. XI
1	Ein	leitung		1
2	Star	nd des	Wissens	4
	2.1	Stark	regen	4
		2.1.1	Definition	4
		2.1.2	Erfassung und Vorhersage	6
		2.1.3	Prognosen zum zukünftigen Auftreten	7
		2.1.4	Folgen von Starkregen im urbanen Raum	8
	2.2	Stark	regenindex (SRI)	. 10
	2.3	Mode	ellierung im Rahmen des Starkregenmanagements	. 14
		2.3.1	Hydrologische Modellierung	. 14
		2.3.2	Hydraulische Modellierung	. 16
		2.3.3	Oberflächenabflussbildungsprozesse	. 17
		2.3.4	Gefährdungsanalyse	. 18
3	Pro	blemste	ellung und Zielsetzung	. 23
4	Met	thoden	und Vorgehensweise	. 25
	4.1	Besch	nreibung der Untersuchungsgebiete	. 26
		4.1.1	EZG Zentrum Achalm	. 27
		4.1.2	EZG Zentrum Nord	. 30
		4.1.3	EZG Gönningen	. 32
	4.2	Besch	nreibung der Niederschlagsereignisse	. 34
		4.2.1	Ereignis am 24. – 25. Juni 2016	. 35
		4.2.2	Ereignis am 11. Juni 2018	. 38
	4.3	Wahl	der Untersuchungsgebiete und Niederschlagsereignisse	. 40
	4.4	Stark	regenindex (SRI)	. 40

		4.4.1	Erstellung der SRI-Matrizen	. 41
		4.4.2	Ereignisbezogener SRI	. 44
	4.5	Hydro	ologische und hydraulische Modellierung mit RoGeR	. 48
		4.5.1	Das Modell RoGeR	. 48
		4.5.2	Szenarienmodellierung mit RoGeR	. 59
		4.5.3	Auswertung der Modellierungsergebnisse	. 64
5	Erg	ebnisse)	. 67
	5.1	SRI		. 67
		5.1.1	SRI-Matrizen	. 67
		5.1.2	Ereignisbezogener SRI	. 69
	5.2	Hydro	ologische und hydraulische Modellierung mit RoGeR	. 72
		5.2.1	Getrennte Auswertung: Überflutungstiefen und Fließgeschwindigkeiten	. 74
		5.2.2	Kombinierte Auswertung: Überflutungstiefe und Fließgeschwindigkeit	. 78
		5.2.3	Gefahrenklassen	. 82
	5.3	Verkı	nüpfung der Ergebnisse: SRI und Modellierung	. 83
6	Dis	kussior	1	. 86
	6.1	SRI		. 86
		6.1.1	SRI-Matrizen	. 86
		6.1.2	Ereignisbezogener SRI	. 88
	6.2	Hydro	ologische und hydraulische Modellierung mit RoGeR	. 89
		6.2.1	Realitätsnähe der Überflutungstiefen und Fließgeschwindigkeiten	. 89
	6.3	Evalu	nation des Zusammenhangs: ÜT- und FG-Ausbildung & SRI	. 93
		6.3.1	Gleiches Szenario, verschiedene EZGs	. 94
		6.3.2	Verschiedene Szenarien, gleiches EZG	. 95
		6.3.3	Gefahrenklassen	. 96
		6.3.4	SRI zur Kommunikation mit der Bevölkerung notwendig?	. 96
7	Sch	lussfol	gerung und Ausblick	. 97
An	hang .			100

	Anhang 2	
	Anhang 3	. 102
	Anhang 4	. 104
	Anhang 5	. 107
	Anhang 6	. 108
	Anhang 7	. 110
Abl	kürzungsverzeichnis	. 111
Erk	lärung	112
Lite	eraturverzeichnis	113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Warnkriterien des DWDs zu Starkregen (DWD, 2019b)	5
Abbildung 2.2:	Wetterradarnetz des DWD (links) und Bodenmessnetz des DWD und der Bundesländer, der in Echtzeit verfügbaren Niederschlagsdaten (rechts) (DWD, 2018a; DWD, 2019c)	6
Abbildung 2.3:	Am Beispiel des Ereignisses in Münster am 28. Juli 2014 dargestellte Erfassung von Starkregenereignissen durch Bodenstationen (links), RADOLAN-Online-Aneichung (mitte) und RADOLAN-Klima offline Aneichung (Winterrath et al., 2018)	7
Abbildung 2.4:	Überschwemmungsursache Starkregen (links) und ausufernde Gewässer (rechts) (LUBW, 2016)	9
Abbildung 2.5:	Skizzierte von der jeweiligen Starkregen-Kategorie ausgehende Überflutungsgefahr zur Risikokommunikation mit der Öffentlichkeit (Schmitt et al., 2018)	13
Abbildung 2.6:	SRI-Skala der Stadt Hamburg in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit (Hamburg Wasser, 2019)	13
Abbildung 2.7:	Verschiedene Modellansätze zur 2D-hydraulischen Modellierung (verändert, HSB, 2017)	17
Abbildung 2.8:	Beispiellegende für die Darstellung von ÜT und FG in SRGK (LUBW, 2016)	19
Abbildung 2.9:	Gefahrenkurven bezogen auf die für Menschen, Fahrzeuge und Gebäude potenzielle Gefahr durch verschiedene Kombinationen aus ÜT und FG (übersetzt, Smith et al., 2014)	22
Abbildung 2.10:	Links: Produkt aus modellierten FG und ÜT; Rechts: Gefahrenklassen Zuordnung (Smith und McLuckie, 2015)	22
Abbildung 4.1:	Übersicht zum Vorgehen in der Methodik	25
Abbildung 4.2:	Links: Lage der Stadt Reutlingen in Baden-Württemberg (BKG, 2011)	
	Rechts: Stadt Reutlingen mit Stadtteilen (Siedlungsgebiete in Rot)	26
Abbildung 4.3:	Lage der EZG ACH, NO, GOE und der NdStationen innerhalb der Stadt Reutlingen (Datenquelle: Stadt Reutlingen, 2019; RoGeR Eingangsdaten)	27
Abbildung 4.4:	Karten zur Landnutzung und zum Versiegelungsgrad im EZG ACH (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten)	28
Abbildung 4.5:	Karten zu Geländehöhe, Gefälle, Hydrogeologie und Bodenart im EZG ACH (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten; Hydrogeologie: LGRB)	29
Abbildung 4.6:	Karten zur Landnutzung und zum Versiegelungsgrad im EZG NO (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten)	30

Abbildung 4.7:	Karten zu Geländehöhe, Gefälle, Hydrogeologie und Bodenart im EZG NO (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten; Hydrogeologie: LGRB)	31
Abbildung 4.8:	Karten zur Landnutzung und zum Versiegelungsgrad im EZG GOE (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten)	32
Abbildung 4.9:	Karten zu Geländehöhe und Gefälle im EZG GOE (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten)	33
Abbildung 4.10:	Karten zu Hydrogeologie und Bodenart im EZG GOE (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten; Hydrogeologie: LGRB)	34
Abbildung 4.11:	Feuerwehreinsätze im Stadtgebiet Reutlingen während der Ereignisse 2016 und 2018.	35
Abbildung 4.12:	An Stationen S1-S12 verzeichnete Niederschlagsmengen während des Ereignisses am 24 25. Juni 2016.	36
Abbildung 4.13:	Kachelmann-Radarbilder der kalibrierten 5-minütigen Niederschlagssummen am 24. Juni 2016 (Kachelmann GmbH, 2019)	37
Abbildung 4.14:	An Stationen S1-S12 verzeichnete Niederschlagsmengen während des Ereignisses am 11. Juni 2018.	38
Abbildung 4.15:	Kachelmann-Radarbilder der kalibrierten 5-minütigen Niederschlagssummen am 11. Juni 2018 (Kachelmann GmbH, 2019)	39
Abbildung 4.16:	Beispielhafte Darstellung eines KOSTRA-Rasters der Dauerstufe D = 5 min und der Wiederkehrzeit T_n = 1 a mit der geografischen Lage des Stadtgebiets Reutlingen	42
Abbildung 4.17:	Ausschnitt der im Stadtgebiet Reutlingen liegenden KOSTRA-Raster	42
Abbildung 4.18:	Farbliche Kennzeichnung der SRI und zugehörige Starkregenkategorien (Schmitt et al., 2018)	44
Abbildung 4.19:	Jahresniederschlagssummen der 12 Niederschlagsmessstationen (S1 – S12) in Reutlingen seit der Installation der ersten zehn Messstationen im Jahr 2014	45
Abbildung 4.20:	Beschreibung des Vorgehens zur Bildung von Dauerstufen (DWA, 2012)	46
Abbildung 4.21:	Grafische Zuteilung der Niederschlagsstationen zu einem KOSTRA-Raster	47
Abbildung 4.22:	Schematische Darstellung der in RoGeR implementierten Prozesse und Komponenten der Abflussbildung (Steinbrich et al., 2016a, verändert)	49
Abbildung 4.23:	Feinbodenklassen entsprechend der KA5 (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005).	54
Abbildung 4.24:	Häufigkeitsverteilungen der extrahierten Vorereignis Bodenfeuchten für den hydrologischen Sommer, Winter und das ganze Jahr an den Stationen U.L. und O.L.	57

Abbildung 4.25:	Thiessen-Polygone zur Bildung der Gebietsniederschläge (Nd. ACH, Nd. NO und Nd. GOE) jedes EZGs	61
Abbildung 4.26:	Grafik der Stations- und Gebietsniederschläge (S7 & S11 gew. Mittel und S5 & S7 gew. Mittel) des Ereignisses am 24.06.2016	63
Abbildung 4.27:	Grafik der Stations- und Gebietsniederschläge (S7 & S11 gew. Mittel und S5 & S7 gew. Mittel) des Ereignisses am 11.06.2018	63
Abbildung 4.28:	Kombination der ÜT- und FG-Klassen (lila Linien) mit den von Smith et al. (2014) definierten Gefahrenklassen.	65
Abbildung 5.1:	SRI-Matrix des KOSTRA-Rasters 87028 entsprechend der Methodik nach Schmitt et al. (2018)	68
Abbildung 5.2:	Grafik der Niederschlagshöhen aller Dauerstufen der SRI-Matrix des KOSTRA-Rasters 87028.	69
Abbildung 5.3:	Für Ereignis 2016 für jede Dauerstufe ermittelte SRI aller 12 NdStationen	70
Abbildung 5.4:	Für Ereignis 2016 und jede Dauerstufe ermittelte SRI der für die Szenarienmodellierung gebildeten Gebietsniederschläge und der dafür verwendeten NdStationen	70
Abbildung 5.5:	Oben: Für Ereignis 2018 für jede Dauerstufe ermittelte SRI aller 12 Nd Stationen	
	Unten: Für Ereignis 2018 und jede Dauerstufe ermittelte SRI der für die Szenarienmodellierung gebildeten Gebietsniederschläge und der dafür verwendeten NdStationen.	71
Abbildung 5.6:	Räumlich differenzierte Darstellung der über das Ereignis 2016 hinweg maximal aufgetretenen Überflutungstiefen in EZG ACH für die aus Station 11 gebildeten Gebietsniederschlagsbelastung.	72
Abbildung 5.7:	Räumlich differenzierte Darstellung der über das Ereignis 2016 hinweg maximal aufgetretenen Überflutungstiefen in EZG ACH für die aus Station 11 gebildete Gebietsniederschlagsbelastung	73
Abbildung 5.8:	Säulendiagramme der ÜT aller Szenarien der Ereignisse 2016 und 2018	76
Abbildung 5.9:	Säulendiagramme der FG aller Szenarien der Ereignisse 2016 und 2018	77
Abbildung 5.10:	Matrizen der kombinierten ÜT- und FG-Klassen aller EZG und Szenarien des Ereignisses am 24. Juni 2016	79
Abbildung 5.11:	Matrizen der kombinierten ÜT- und FG-Klassen aller EZG und Szenarien des Ereignisses am 11. Juni 2018.	80
Abbildung 5.12:	Kombinierte Abbildung der Matrizen der kombinierten ÜT- und FG-Klassen aller EZG und aller Szenarien der Ereignisse 2016 und 2018 (Abb. 5.10 und 5.11) in Kombination mit den Abbildungen der Säulendiagramme der ÜT und FG (Abb. 5.8 und 5.9)	81

Abbildung 5.13:	Übertragung der Gefahrenklassen auf die aus kombinierten ÜT und FG erstellten Matrizen	82
Abbildung 5.14:	Übertragung der Gefahrenklassen auf die Ereignisse 2016 und 2018	85
Anh. Abbildung 1:	Darstellung des Reutlinger Stadtgebiets mit den EZG der Echaz, der Wiesaz, Teileinzugsgebeiten (TEZG) des Neckars und deren TEZG	100
Anh. Abbildung 2:	Grafik des durch das Reutlinger Bodenmessnetz aufgezeichnete Starkregenereignis im August 2015	101
Anh. Abbildung 3:	Grafik des durch das Reutlinger Bodenmessnetz aufgezeichnete Starkregenereignis Anfang Juni 2018	101
Anh. Abbildung 4:	SRI-Matrizen der KOSTRA-Raster 87028, 88027, 88028, 89027 und 89028	104
Anh. Abbildung 5:	Für das Ereignis am 09. – 10. August 2015 für jede Dauerstufe ermittelte SRI aller 12 NdStationen.	107
Anh. Abbildung 6:	Für das Ereignis am 06. – 07. Juni 2018 für jede Dauerstufe ermittelte SRI aller 12 NdStationen.	107
Anh. Abbildung 7:	Räumlich differenzierte Darstellung der über das Ereignis 2016 hinweg maximal aufgetretenen Überflutungstiefen (oben) und Fließgeschwindigkeiten (unten) in EZG GOE für die aus Station 11 gebildete Gebiesniederschlagsbelastung.	108
Anh. Abbildung 8:	Räumlich differenzierte Darstellung der über das Ereignis 2016 hinweg maximal aufgetretenen Überflutungstiefen (links) und Fließgeschwindigkeiten (rechts) in EZG NO für die aus Station 11 gebildete Gebiesniederschlagsbelastung.	109
Anh. Abbildung 9:	Automatisch von RoGeR erstellte Grafiken der maximalen Wasserstände im Lauf der Ereignismodellierung pro Zeitschritt im EZG GOE für Szenario Nd. S11 2016 (Ausschnitt der modellierten Zeitschritte von Minute 37 bis 50)	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Definierte Kategorien des "Rain Storm Severity Index" nach Grisa (2013, übersetzt)	10
Tabelle 2.2:	Empfohlene Werte zur Dimensionierung des Entwässerungssystems (Schmitt, 2014)	11
Tabelle 2.3:	Zuordnung eines dimensionslosen SRI zu Wiederkehrintervallen (Schmitt, 2014)	11
Tabelle 2.4:	In Merkblatt DWA-M 119 vorgeschlagene Zuordnung von Wasserständen zu Gefahrenklassen (verändert, DWA, 2016)	20
Tabelle 2.5:	Potenziell für Leib, Leben, Infrastruktur und Objekte bestehende Gefahr in Abhängigkeit der ÜT (LUBW, 2016)	20
Tabelle 2.6:	Potenziell für Leib und Leben und Infrastruktur und Objekte bestehende Gefahr in Abhängigkeit der FG (LUBW, 2016)	21
Tabelle 2.7:	Übersicht der zur Erstellung der Gefahrenkurven zugrundeliegenden Grenzwerte (übersetzt, Smith et al., 2014)	21
Tabelle 4.1:	Prozentuale Anteile der Landnutzungsklassen an der gesamten EZG-Fläche und der Versiegelungsgrade an der versiegelten Fläche des EZGs ACH	28
Tabelle 4.2:	Prozentuale Anteile der Landnutzungsklassen an der gesamten EZG-Fläche und der Versiegelungsgrade an der versiegelten Fläche des EZGs NO	30
Tabelle 4.3:	Prozentuale Anteile der Landnutzungsklassen an der gesamten EZG-Fläche und der Versiegelungsgrade an der versiegelten Fläche des EZGs GOE	33
Tabelle 4.4:	Zusammenfassung der mit der als Ankerwert definierten Regenhöhe der Wiederkehrzeit $T_n = 100$ a multiplizierten Erhöhungsfaktoren zur Ermittlung der Regenhöhen der SRI > 8 .	43
Tabelle 4.5:	Modellparameter in RoGeR (Steinbrich et al., 2016a)	50
Tabelle 4.6:	Definition der Kennwerte zum Wasser- und Lufthaushalt des Bodens	
	(Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005)	54
Tabelle 4.7:	Zusammenfassung der an den Stationen Oberer und Unterer Lindenhof ermittelten Vorfeuchtebedingungen der Ereignisse 2016 und 2018	58
Tabelle 4.8:	Zusammenfassung der durchgeführten Szenarienmodellierungen mit RoGeR	60
Tabelle 4.9:	Zusammenfassung der Thiessen-Polygon-Anteile der Niederschlagsstationen an den modellierten EZG, den daraus resultierenden Gebietsniederschlägen für die Modellierung mit RoGeR.	62
Tabelle 4.10:	Zusammengefasste Darstellung der zur Gruppierung der ÜT herangezogenen Grundlagen aus Merkblatt DWA-M 119 (DWA, 2016) und dem Leitfaden (LUBW, 2016)	64

Tabelle 5.1:	Zusammenfassung der maximalen SRI der modellierten Szenarien und der Ereignissummen.	84
Anh. Tabelle 1:	Maxima der gebildeten Dauerstufen Niederschlagsstationen im Reutlinger Stadtgebiet für das Ereignis am 2425. Juni 2016	102
Anh. Tabelle 2:	Maxima der gebildeten Dauerstufen Niederschlagsstationen im Reutlinger Stadtgebiet für das Ereignis am 11. Juni 2018	103

Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren traten Überflutungen in urbanen Räumen infolge von lokal begrenzten Starkregenereignissen vermehrt ins Bewusstsein der Bevölkerung. Mit dem voranschreitenden Klimawandel wird eine Zunahme solcher Extremereignisse prognostiziert. Ihr hohes Schadenspotenzial bedingt sich aus der schlechten Vorhersagemöglichkeit und der kurzen Reaktionszeit, die das Ergreifen von kurzfristigen Schutzmaßnahmen verhindert. Zur Schadenspotenzialminimierung bedarf es der Erstellung von Handlungskonzepten, die eine Überflutungsgefahrenanalyse sowie die Aufklärung der Bevölkerung beinhaltet. Da Niederschläge in für fachfremde Personen schwer verständlichen Wiederkehrzeiten kommuniziert werden, wurde die Einführung eines dimensionslosen Starkregenindex vorgeschlagen. Dieser soll im Rahmen der Risikokommunikation über die von einem Starkregen ausgehende Überflutungsgefahr in Siedlungsgebiete aufklären. Der aktuellen Methodik nach basiert dieser jedoch nur auf pluvialen Faktoren, welche nur einen Teil der Parameter ausmachen, die die in einem EZG ablaufenden Oberflächenabflussprozesse beeinflussen. Dementsprechend stellt die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem einem Starkregenereignis zugeordneten SRI und der von dem Ereignis ausgehenden Überflutungsgefahr den zentralen Punkt dieser Arbeit dar. Mittels dem Modell RoGeR wurde die Oberflächenabflussbildung in drei im Stadtgebiet Reutlingen liegenden Einzugsgebieten mit unterschiedlichen Eigenschaften für verschiedene Niederschlagsszenarien modelliert. Den Niederschlagsszenarien, die sich aus zwei in der Vergangenheit über Reutlingen niedergegangenen Starkregenereignissen ergaben, wurde entsprechend der SRI-Methodik ein SRI zugeordnet, um den zu prüfenden Zusammenhang zu den Modellierungsergebnissen herstellen zu können. Zur Evaluierung der sich ergebenden Überflutungsgefahr wurden Gefahrenklassen zugeordnet. Aus den Modellierungen ergab sich eine klare Abhängigkeit der Oberflächenabflussbildung von der Niederschlagsdauer, -intensität und -ereignissumme. In den Modellierungen ergaben sich die höchsten maximalen Überflutungstiefen und Fließgeschwindigkeiten für hohe Niederschlagsintensitäten in kurzen Dauerstufen. In Bezug auf den SRI ließen sich gegensätzliche Aussagen treffen, die dessen mangelnde Aussagekraft über die von dem Starkregenereignis ausgehende Überflutung unterstrichen. Da im Rahmen dieser Arbeit nur zwei verschiedene Ereignisse betrachtet werden konnten, bedarf es weiterer Modellierungen, um die hohe Variabilität der Niederschlagsereignisse hinsichtlich Dauer und Intensität und deren Einfluss auf die Überflutungsgefahr tiefergehend zu analysieren. Es konnte mit dieser Arbeit gezeigt werden, dass der rein pluvial basierte SRI keine Aussage über die von einem Starkregenereignis ausgehende Überflutungsgefahr zulässt. Hierzu müsste der SRI an die hydrologischen und hydraulischen Gegebenheiten des betrachteten Einzugsgebiets angepasst werden. Mit dieser Anpassung müsste eine Umbenennung des Index, entsprechend seiner Aussagekraft in bspw. hydrologisch-hydraulischer Index erfolgen.

Stichworte: Starkregenindex, Niederschlags-Abflussmodellierung, 2D-hydraulische Modellierung, RoGeR, Gefährdungsanalyse, Reutlingen

Einleitung 1

1 Einleitung

Überflutungen sind ein in der Geschichte der Menschheit altbekanntes Naturphänomen, das neben seiner zerstörerischen Kraft auch Erschaffer von Lebensgrundlagen ist (LfU, 2008). In der medialen Berichterstattung überwiegen jedoch seit Jahrzehnten Meldungen von Hochwasserereignissen an Flüssen (fluviale Ereignisse), die schwere Schäden hinterließen und dadurch ins Bewusstsein der Menschen rückten. Ein vergleichsweise neuartiges Phänomen sind Überflutungen im urbanen Raum unabhängig von Fließgewässern (pluviale Ereignisse), infolge von Starkregenereignissen (LUBW, 2016; Mudersbach, 2016; Bernhart und Albrecht, 2018). Im Gegensatz zu fluvialen Ereignissen, die meist in Verbindung mit langanhaltenden, großflächigen Niederschlägen auftreten, sind pluviale Ereignisse eine Folge von kurzen, lokal begrenzten, konvektiven Niederschlagsereignissen mit hohen Niederschlagsintensitäten. Ein weiterer Punkt, in dem sich die beiden Phänomene voneinander unterscheiden, sind deren Vorwarnzeiten. Hat man im Hochwasserfall oft eine gewisse Reaktionszeit, um sich auf die maximalen Wasserstände vorzubereiten und Schutzmaßnahmen zu ergreifen, ereignen sich durch Starkregen induzierte Überflutungen in den meisten Fällen sehr plötzlich und überraschend. Daraus ergibt sich ein besonders hohes Schadenspotenzial (BBR, 2018; Winterrath et al., 2018). Sehr schwerwiegende Beispiele für extreme Starkregenauswirkungen sind die Sturzfluten von 2016 in Braunsbach und Simbach, die Schäden in Millionenhöhe verursachten und teilweise Menschenleben kosteten (Bronstert et al., 2017; Disse und Kaiser, 2018; Fischer und Schumann, 2018; Günthert et al., 2018).

Obgleich die Niederschlagsvorhersage mit der bundesweiten Abdeckung durch Radarstationen in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte machte, ist die Vorhersage von Starkregenereignissen nach wie vor sehr ungenau. Dies liegt zum einen an der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität konvektiver Ereignisse und zum anderen an mangelnden Startwerten, um radardatenbasierte Modellierungen zur Vorhersage durchführen zu können (Becker, 2016; LAWA, 2018; Winterrath et al., 2018). Dazu wird mit dem voranschreitenden Klimawandel eine Zunahme von Starkregenereignissen für die Zukunft prognostiziert (Becker, 2016; Brasseur et al., 2017; Steinbrich et al., 2018; IPCC, 2019). Verstärkt wird die Problematik durch die voranschreitende Urbanisierung und den zunehmenden Grad der Versiegelung der Erdoberfläche (UN, 2019). Dies führt dazu, dass anfallender Niederschlag nicht in den Untergrund versickern kann und sich oberflächlich sammelt und abfließt. Das Resultat ist unkontrolliert und wild abfließendes Wasser, das besonders in urbanen Räumen große Schäden anrichten kann.

In den letzten Jahren wuchs der Konsens des dringenden Handlungsbedarfs eines urbanen Starkregenmanagementkonzepts. Seither wurden eine Vielzahl von Studien, Leitfäden und Arbeitshilfen herausgebracht (HSB, 2017; BBR, 2018; MULNV, 2018; Günthert et al., 2018; STMUV, 2019). Die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) veröffentlichte 2016 einen Leitfaden für Baden-Württemberg und schuf damit eine Grundlage für das Starkregenrisikomanagement (LUBW, 2016). Loat und Petrascheck (2001) betonen, dass die

2 Einleitung

Voraussetzung für den "verantwortungsvolle[n] Umgang mit Naturgefahren [...] zuallererst ihre bewusste Wahrnehmung [Hervorhebung im Original] [erfordert]." Erfolgsträchtige Maßnahmen setzen voraus, dass sich alle beteiligten Akteure der potenziellen Gefahren bewusst sind. Die Überflutungsvorsorge wird in der Zukunft verstärkt zu einer Gemeinschaftsaufgabe von Behörden und Bürgern (Dosch, 2015). Obwohl die Kommunen nach § 46 Abs. 1 des Wassergesetzes Baden-Württemberg (WG) zur Beseitigung des Abwassers verpflichtet sind, können diese einen umfassenden Überflutungsschutz wirtschaftlich und technisch nicht leisten. Vor allem erfolgt die Dimensionierung der Kanalisation auf Basis der örtlichen Niederschlagsstatistik und kann zukünftige potenzielle, dem Klimawandel geschuldete Verschiebungen des Starkregenauftretens nur bedingt miteinbeziehen (UN, 2019). Dementsprechend wird auch davon ausgehend mit einer steigenden Überflutungsgefahr gerechnet, was die Notwendigkeit der zusätzlichen, privaten Überflutungsvorsorge unterstreicht (LUBW, 2016).

Zur Aufklärung der Bevölkerung über die bestehende Überflutungsgefahr griff Schmitt (2014) einen Vorschlag von Grisa (2013) zur Erstellung eines dimensionslosen Index auf, da Niederschläge bisher in nicht-intuitiven, schwer verständlichen Wiederkehrintervallen kommuniziert werden. Grisa (2013) orientierte sich zur Entwicklung des Starkregenindex (SRI) an Skalen wie der Richterskala zur Bestimmung der Stärke von Erdbeben oder der Fujita-Skala zur Klassifikation von Tornados. Der von Schmitt et al. (2018) in Deutschland eingeführte SRI wurde über 12 Stufen aufgespannt und soll das Bewusstsein für die von potenziell auftretenden Starkniederschlägen ausgehende Gefahr stärken.

Um Schäden infolge von Starkregen in urbanen Gebieten zu mindern, müssen diese möglichst an die potenziellen Gefahren angepasst werden. Dementsprechend müssen die von Starkregenereignissen ausgehenden Überflutungsgefahren analysiert und bestimmt werden. Im Leitfaden für Baden-Württemberg (LUBW, 2016) wird deshalb die Erstellung von Starkregengefahrenkarten (SRGK) aufgetragen. Diese sollen die Identifikation besonders vulnerabler Gebäude und ungünstiger Strukturen in urbanen Räumen ermöglichen. Somit stellen sie zum einen eine wesentliche Voraussetzung für raumplanerische Maßnahmen von Seiten der Behörden dar, aber auch für Umsetzungen individueller Maßnahmen der Grundeigentümer zum Selbstschutz. Zu deren Erstellung wurden an der Professur für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg i. Br. für Baden-Württemberg flächendeckende Oberflächenabflusskennwerte (OAK) erstellt. Dies erfolgte mit dem eigens entwickelten Modell RoGeR, für drei verschiedene extreme, lokale Niederschläge (Steinbrich et al., 2016b).

In dieser Arbeit werden zwei in der Vergangenheit in der Stadt Reutlingen niedergegangene Starkregenereignisse mittels des SRI klassifiziert. Außerdem wird die Oberflächenabflussbildung als Reaktion auf die Niederschlagsereignisse mit dem Modell RoGeR hydrologisch wie auch hydraulisch in drei ausgewählten Einzugsgebieten (EZG) innerhalb der Verwaltungsgrenzen der Stadt Reutlingen modelliert. Die für die Ereignisse und EZG quantifizierten Überflutungstiefen (ÜT) und

Einleitung 3

Fließgeschwindigkeiten (FG) werden ausgewertet und einer Gefahrenklassen zugeordnet. Schlussendlich erfolgt die Verbindung des SRI mit den gebildeten Oberflächenabflüssen.

2 Stand des Wissens

Im Folgenden soll der aktuelle Stand der Forschungslage zu den für diese Arbeit relevanten Themenbereichen wiedergegeben werden. Der Begriff "Starkregen" soll definiert und dessen Erfassung und Messung erläutert werden. Außerdem werden Aussagen zum Trend des Starkregenauftretens und zu den Folgen von Starkregen in urbanen Räumen zusammengefasst. Das darauffolgende Kapitel behandelt den aktuellen Stand der Starkregenindexmethodik. Das letzte Kapitel umfasst die Modellierung der Auswirkungen von Starkregenereignissen auf der Erdoberfläche. Dies beinhaltet die Gefährdungsanalyse und die Einteilung in Gefahrenklassen.

2.1 Starkregen

Wie der Begriff "Stark-Regen" bereits suggeriert, wird er nur für die Bezeichnung von Niederschlagsereignissen verwendet, die sich aufgrund ihres Charakters von der Gesamtheit unterscheiden. Hierfür ist eine Definition nötig, die im ersten Teil des Starkregenkapitels dargelegt werden soll. Im Laufe des Kapitels folgen Ausführungen zu deren Erfassung und Vorhersagemöglichkeiten, Starkregenextremwertstatistiken, Prognosen zum zukünftigen Auftreten und zu deren Folgen in urbanen Räumen.

2.1.1 Definition

Zeichnet sich ein Niederschlagsereignis durch besonders viel Niederschlag im Verhältnis zur Dauer aus, wird dieses als "extrem", oder als Starkregen bezeichnet. Dies beinhaltet Niederschläge von kurzer Dauer mit hohen Intensitäten im Minuten- bis Stundenbereich, wie auch Niederschläge von längerer Dauer, in denen hohe Niederschlagsmengen über mehrere Stunden bis Tage fallen (LANUV NRW, 2010; Brasseur et al., 2017). Niederschläge von kurzer Dauer sind meist lokal begrenzt, dominieren in den Sommermonaten und gehen in den gemäßigten Breiten mit konvektiven Prozessen wie Schauern und Gewittern einher. Niederschläge von längerer Dauer erstrecken sich meist über ein deutlich weiteres Gebiet und dominieren im Winter (DWD, 2016a; Becker, 2016; Brasseur et al., 2017). In einem Großteil der Literatur sind allerdings zumeist kurze Niederschlagsereignisse mit hohen Intensitäten gemeint, wenn der Begriff "Starkregen" Anwendung findet (LUBW, 2016; Fischer und Schumann, 2018; Günthert et al., 2018). Eine global einheitliche, auf Absolutwerte gestützte Starkregendefinition gibt es nicht. Durch die von Ort zu Ort starken Klimaunterschiede würde ein und dasselbe Niederschlagsereignis unterschiedlich eingestuft werden (DWD, 2019d). Beispielsweise beträgt der höchste je in Deutschland gemessene 24-Stunden Niederschlag 312 mm in Zinnwald im Jahr 2002 (WMO, 1994; Schönwiese, September 2008; Brasseur et al., 2017). Damit liegt der Tagesrekord in Deutschland noch unterhalb des weltweiten Rekords eines einstündigen Niederschlagsereignisses mit 401 mm in Shangdi, China im Jahr 1975 (WMO, 1994). Verschiedene Ansätze zur Starkregenklassifikation sind die Betrachtung der Überschreitung eines Niederschlagsschwellenwerts, einer Datenmenge ober- oder unterhalb einer statistisch ermittelten Schwelle wie Perzentile, oder der

Auftretenswahrscheinlichkeit einer Niederschlagshöhe (Brasseur et al., 2017). Wird im Laufe dieser Arbeit von Starkregen gesprochen, wird damit, wenn nicht anders erwähnt, auf kurze, lokale Ereignisse Bezug genommen.

Der DWD definiert Starkregen anhand von Schwellenwerten und unterscheidet dabei 3 Stufen, die als Warnkriterien dienen (Abb. 2.1). Die Warnkriterien gelten deutschlandweit und sind nicht an örtliche Niederschlagsstatistiken angepasst (DWD, 2019b). Im Rahmen der kommunalen Überflutungsvorsorge bezeichnet DWA-M 119 (DWA, 2016) Starkregen als Niederschlagsereignis mit Regenhöhen in verschiedenen Dauerstufen mit Wiederkehrinterzeiten (T_n) von ≤ 1 a. Scherrer (2006) definiert intensive Starkregen über den Schwellenwert der Niederschlagsintensität von > ca. 20 mm/h.

WARNEREIGNIS	SCHWELLENWERT	DARSTELLUNG	STUFE
Starkregen	15 bis 25 l/m² in 1 Stunde 20 bis 35 l/m² in 6 Stunden	30	2
Heftiger Starkregen	25-40 l/m² in 1 Stunde 35-60 l/m² in 6 Stunden	30	3
Extrem heftiger Starkregen	> 40 l/m² in 1 Stunde > 60 l/m² in 6 Stunden	34	4

Abbildung 2.1 Warnkriterien des DWDs zu Starkregen (DWD, 2019b)

Besonders zur Umsetzung städtebaulicher Maßnahmen wie beispielsweise der Dimensionierung der Kanalisation müssen Starkregen ortsgebunden definiert und kategorisiert werden (DWA, 2012). Die Untersuchung des Auftretens extremer Ereignisse erfolgt über Extremwertstatistiken an einzelnen Niederschlagsstationen. Da in den meisten Fällen Daten an Orten benötigt werden, in deren unmittelbarer Nähe sich keine Niederschlagsstation mit langjährigen Messreihen befindet, müssen flächendeckende Datensätze geschaffen werden. Diese bietet der DWD mit der seit den 1980ern herausgegebenen "Koordinierte(n) Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung (KOSTRA)". Über die Jahre erfuhr sie mehrmalige Überarbeitung und liegt nunmehr in der Version KOSTRA-DWD-210R vor (Junghänel et al., 2017). Zu dessen Erstellung wurden punktuell ermittelte Starkniederschlagshöhen aus den Jahren 1951 bis 2010 verwendet, welche statistisch ausgewertet und mittels Regionalisierungsmethoden auf Bereiche übertragen wurden, für die keine langjährigen Niederschlagsmessungen vorlagen (Malitz, 2005). Steinbrich et al. (2016b) wandten ein aufwändiges "Mutter-Tochter"-Verfahren an und werteten Starkregenaufkommen für Baden-Württemberg aus. Sie bedurften eines höher aufgelösten, flächigen Datensatzes, als KOSTRA es bot. Im Zuge des Klimawandels wird eine Veränderung des Starkregenauftretens und somit eine Verschiebung der bisher definierten Starkregenwerte und Warnkriterien erwartet. Damit stellt sich die Frage nach der weiteren Gültigkeit von Extremwertstatistiken, da diese auf der Annahme der Stationarität basieren (Mudersbach

et al., 2017). Fischer und Schumann (2018) hinterfragten die in Arbeitsblatt DWA-A 531 (DWA, 2012) geregelte Methodik der extremwertstatistischen Analyse und befanden, dass diese extreme Starkregenereignisse in kurzen Dauerstufen massiv unterschätzt.

2.1.2 Erfassung und Vorhersage

Der DWD betreibt seit ca. 130 Jahren ein deutschlandweites Bodenmessnetz zur Niederschlagsmessung mit einer räumlichen und zeitlichen Auflösung von 10 km x 10 km und 1-minütigen Daten bis Tageswerten (Abb. 2.2, rechts) (Becker, 2016; DWD, 2018a). Zur Erfassung der meist sehr kleinräumig auftretenden Starkregenereignisse ist das aktuelle Bodenmessnetz jedoch ungenügend und müsste eine Auflösung von 1 km x 1 km aufweisen. Wie das Beispiel des Extremereignisses 2014 in Münster veranschaulicht, konnte die Bodenstation das Niederschlagsgeschehen nicht akkurat wiedergeben, da die höchsten Niederschlagsmengen abseits der im linken Bild dargestellten Bodenmessstation fielen (Abb. 2.3) (Becker, 2016; Winterrath et al., 2018). Zur flächigen Abbildung und Erfassung solcher Niederschlagsereignisse kommt ein vom DWD seit dem Jahr 2000 in Deutschland in Betrieb genommener Wetterradarverbund zum Einsatz. Dieser umfasst 18 Standorte und deckt damit ganz Deutschland ab (DWD, 2019e). Da dieser nicht den bodennahen Niederschlag erfasst, sondern die von Regen oder Schnee in mehreren Kilometern Höhe reflektierten Signale misst und dadurch sehr fehleranfällig ist, bedarf es eines Korrekturverfahrens. Dies kann in Echtzeit auf Basis von direkt verfügbarer Bodenmessungen erfolgen (Abb. 2.3, mitte) oder in einem nachträglichen Rechenverfahren unter Hinzunahme weiterer Messdaten, die nicht in Echtzeit verfügbar sind (Winterrath et al., 2018).

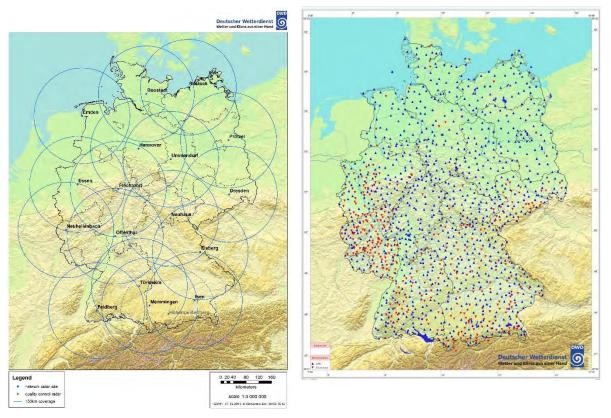


Abbildung 2.2 Wetterradarnetz des DWD (links) und Bodenmessnetz des DWD und der Bundesländer, der in Echtzeit verfügbaren Niederschlagsdaten (rechts) (DWD, 2018a; DWD, 2019c)

Trotz der verbesserten großflächigen Datenlage durch die Radarmessung, können Ort, Zeit und Intensität von Starkregenereignissen nicht ausreichend genau vorhergesagt werden. Dies begründet sich in deren hoher räumlichen und zeitlichen Variabilität. Zwar stünde für den Betrieb aufwändiger Vorhersagemodelle ausreichend Rechenkapazität zur Verfügung, jedoch mangelt es an Beobachtungssystemen zur Ermittlung nötiger Anfangswerte (Winterrath et al., 2018).

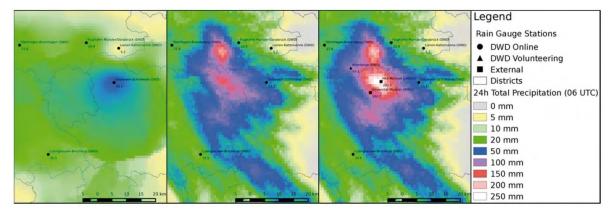


Abbildung 2.3 Am Beispiel des Ereignisses in Münster am 28. Juli 2014 dargestellte Erfassung von Starkregenereignissen durch Bodenstationen (links), RADOLAN-Online-Aneichung (mitte) und RADOLAN-Klima offline Aneichung (Winterrath et al., 2018).

2.1.3 Prognosen zum zukünftigen Auftreten

Für die Zukunft wird eine globale Zunahme von Starkniederschlagsereignissen erwartet. Zwar sind Klimamodelle zum momentanen Zeitpunkt nicht in der Lage, kleinskalige Klimaprozesse wie konvektive Niederschlagsereignisse in die Zukunft zu projizieren, jedoch ermöglicht die durch den Klimawandel bedingte Erwärmung der Atmosphäre entsprechend der Clausius-Clapeyron-Gleichung eine Mehraufnahme von Wasserdampf, was Niederschläge mit höheren Intensitäten ermöglicht (Brasseur et al., 2017; IPCC, 2019). Außerdem wird vermutet, dass die ansteigenden Temperaturen der Atmosphäre einen Wandel der wolken- und niederschlagsbildenden Prozesse auf der konvektiven Skala hin zu gesteigerter Intensität bedingen. Starkniederschläge würden demnach im Vergleich zur Änderung des mittleren Niederschlags überproportional zunehmen (Berg et al., 2013; Becker et al., 2016).

Genaue Prognosen über das örtliche Niederschlagsauftreten sind jedoch dadurch nicht zu treffen. Die Niederschlagsbildung wird über einen weiten Bereich der zeitlichen und räumlichen Skala von verschiedenen Prozessen beeinflusst (Becker et al., 2016). Ein Beispiel für die höhere räumliche und zeitliche Ebene ist, die mit dem voranschreitenden Klimawandel erwartete Veränderung in der Häufigkeit des Auftretens von Wetterlagen. Mit dem Begriff "Wetterlage" wird der großskalige, atmosphärische Zustand über einer Region beschrieben. Einige Wetterlagen zeichnen sich dadurch aus, dass sie viel Niederschlag mit sich bringen oder konvektive Dynamiken begünstigen. Für diese Art von Wetterlagen konnten steigende Trends beobachtet werden (Ziese et al., 2016; Brasseur et al., 2017).

Lehmann et al. (2015) zufolge nahm die Zahl der weltweiten extremen Niederschlagsereignisse mit der Erwärmung der Erdatmosphäre zwischen 1980 und 2010 statistisch signifikant zu. Für Deutschland konnte eine Zunahme der täglichen Niederschläge im Winter festgestellt werden. Für die Sommermonate konnte hingegen kein steigender Trend beobachtet werden. Extreme Niederschläge bringen im Sommer jedoch deutlich höhere Niederschlagsmengen als im Winter (DWD, 2016a; Brasseur et al., 2017). Auch über eine Veränderung der räumlichen Verteilung von Starkregenereignissen lässt sich bislang keine Aussage treffen. Zwar zeichnet der Wetterradarverbund flächig Niederschlagsereignisse auf, dies aber erst seit ca. 15 Jahren, was aufgrund der kurzen Zeitreihenlänge keine belastbaren Informationen hervorbringt (Becker et al., 2016).

2.1.4 Folgen von Starkregen im urbanen Raum

Verursacht Niederschlag Schäden in urbanen Räumen, liegt das stark vereinfacht gesagt an der Interaktion des Menschen mit Überflutungsflächen (Smith und McLuckie, 2015). Die Interaktion beinhaltet dabei verschiedene Aspekte. Gebäude wurden zu nah an Fließgewässern errichtet, oder im Weg von Fließwegen, die sich erst im Laufe von Starkregenereignissen zu erkennen geben. Die voranschreitende Versiegelung der Erdoberfläche, die das Versickern des anfallenden Wassers in den Untergrund verhindert, verstärkt diese Problematik zusätzlich (Apel et al., 2016; Schaffitel et al., 2017; UN, 2019). Überschwemmungen können in fluviale Ereignisse (Hochwasserereignisse an Flüssen) und pluviale Ereignisse (i.d.R. unabhängig von Fließgewässern) eingeteilt werden (Abb. 2.4). Die Definitionen enthalten jedoch Überlappungsbereiche, weshalb eine strikte Trennung meist nicht möglich ist (Apel et al., 2016; LUBW, 2016; Kron, 2017; Schmitt et al., 2018).

Fluviale Überflutungsereignisse gehen von ausufernden Fließgewässern in meist größeren Einzugsgebieten (EZG) aus. Auslöser sind langanhaltende großräumige Niederschläge. Die Folge sind aufgesättigte Böden und die Bildung von Sättigungsflächenabfluss (SFA). Die dadurch anfallenden, großen Wassermassen lassen die Gewässer anschwellen, welche angrenzende Bereiche überschwemmen.

Die von pluvialen Ereignissen ausgehende Überflutung wird meist durch kurze, lokalbegrenzte konvektive Starkniederschläge mit hohen Niederschlagsintensitäten ausgelöst. Entsprechend der geringen räumlichen Ausdehnung der Starkniederschlagszellen sind besonders kleine EZG mit kurzen Reaktionszeiten betroffen (Apel et al., 2016; Brasseur et al., 2017). Aus der bis dato schlechten Vorhersage von Starkregen und den kurzen Reaktionszeiten der EZG, ergeben sich sehr kurze Vorwarnzeiten. Laut Marchi et al. (2010) liegen diese unterhalb von 6 Stunden. Dies bedingt auch das von pluvialen Ereignissen ausgehende, hohe Schadenspotenzial. Die Überflutung der Geländeoberfläche kann dabei verschiedene Ursachen haben. Die hohe Versiegelung in urbanen Gebieten verhindert, dass anfallender Niederschlag in den Untergrund versickert. Zusätzlich führen die hohen Niederschlagsintensitäten zu einer Überschreitung der Infiltrationsleistung der Erdoberfläche und somit zur Ausbildung von Oberflächenabfluss, auch Horton'scher Oberschlächenabfluss (HOA)

genannt (Steinbrich et al., 2016b). Somit können von unversiegelten Außengebieten erhebliche Wassermengen im urbanen Raum anfallen, die die Überflutungsgefahr zusätzlich verstärken. Eine weitere Ursache von Überflutungen in urbanen Gebieten ist die überlastete Kanalisation. Gemäß § 46 Abs. 1 des Wassergesetzes Baden-Württemberg (WG) liegt die Abwasserbeseitigungspflicht bei den Kommunen. Als Abwasser gilt gem. § 54 Abs.1 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) alldasjenige Wasser, das gesammelt von befestigten und bebauten Flächen abfließt. Die anfallenden Wassermassen solcher Extremereignisse kann die Kanalisation jedoch meist nicht aufnehmen und schadlos ableiten, da sie hierfür nicht ausgelegt ist. Somit kann besonders an Überstauschächten Wasser aus der Kanalisation an die Oberfläche gedrückt werden. Überflutete Geländesenken, Einstaubereiche, Keller, Straßenunterführungen und auch U-Bahntunnel sind die Folge (Dosch, 2015; LUBW, 2016; Simperler et al., 2019).



Abbildung 2.4 Überschwemmungsursache Starkregen (links) und ausufernde Gewässer (rechts) (LUBW, 2016)

Besonders schwerwiegende durch kleinräumige, intensive Niederschlagsereignisse ausgelöste, plötzlich aufgetretene Überflutungen wurden in der medialen Berichterstattung als Sturzfluten bezeichnet. Beispiele hierfür sind Ereignisse wie Ende Mai 2016 in Braunsbach und im Juni 2016 in Simbach, die Schäden in Millionenhöhe verursachten (Bernhart und Albrecht, 2018; Günthert et al., 2018). Sturzfluten sind häufig eine Kombination aus fluvialen und pluvialen Ereignissen. Die Überschwemmung kann von plötzlich anschwellenden kleineren Fließgewässern ausgehen, wie auch von wild abfließendem Wasser auf der Geländeoberfläche.

Die Ereignisse, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, waren von deutlich geringerem Ausmaß, als in Braunsbach und Simbach. Aufgrund dessen wird der Begriff "Sturzflut" nicht zu deren Bezeichnung verwendet. Jedoch liegt der Fokus ebenso auf kurzen, intensiven, lokal begrenzen Niederschlägen, anstatt von langen, räumlich ausgedehnten Niederschlägen. In den folgenden Kapiteln wird dementsprechend meist von "Überflutung" oder "Überflutung in Folge von Starkregen" gesprochen.

2.2 Starkregenindex (SRI)

Niederschlagsereignisse sind neben den Parametern Dauer D und Regenhöhe hn über ihre Wiederkehrzeit T_n definiert. Damit werden sie laut Grisa (2013) auf Grund ihrer "Seltenheit" ("rarity") beschrieben und nicht auf Grund ihrer "Schwere" ("severity"). Besonders für fachfremde Personen ist es schwer nachvollziehbar, dass beispielsweise ein 100-jährliches Niederschlagsereignis innerhalb weniger Jahre zwei- oder mehrfach auftreten kann. Grisa (2013) schlug die Einführung eines "Rain Storm Severity Index", in Anlehnung an andere Skalen zur Einordnung von Naturkatastrophen vor, wie die Richterskala zur Bewertung von Erdbeben oder die Fujita-Skala zur Wertung von Tornados. Sein erster Ansatz war die Zuordnung von Ereigniskategorien (G) zu Jährlichkeiten (RI) mittels Formeln 1 und 2. Über diesen Ansatz erfolgte die Zuordnung der Ereigniskategorien ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Dauern und Intensitäten. Deshalb wurde Formel 2 um die Anpassungsfaktoren DAF (Duration Adjustment Factor) für die Dauer und IAF (Intensity Adjustment Factor) für die Intensität des Ereignisses erweitert (Formel 3). Diese bildete die Grundlage für die Kategorisierung des "Rain Storm Severity Index" entsprechend der "Schwere" des Niederschlagsereignisses (Tabelle 2.1). Auf Kritik, Bodenfeuchte miteinbezogen werden sollte, Abflussbildungsreaktionen mit einzubeziehen, betonte er, dass, wie auch bei der Bewertung anderer Naturkatastrophen nur die Niederschlagsstärke selbst bewertet werden soll und nicht die Folgen.

$$RI = 2^{(G-1)}$$
 (1)

$$G = \left\{ 1 + \frac{\log(RI)}{\log(2)} \right\} \tag{2}$$

$$G = \left\{ 1 + \frac{\log(RI)}{\log(2)} \right\} \times DAF \times IAF \tag{3}$$

Tabelle 2.1 Definierte Kategorien des "Rain Storm Severity Index" nach Grisa (2013, übersetzt)

Ereigniskategorie (G)	Niederschlagsereignis- beschreibung	
1 - 2	gering	
3 - 4	moderat	
5 - 6	größer/schwerer	
7-8	extrem	
9 - 10	katastrophal	

Schmitt (2014) griff den Ansatz von Grisa (2013) auf und übertrug diesen auf die deutsche Entwässerungspraxis. Damit verfolgte er besonders das Ziel, die Bevölkerung über die von Starkregenextremereignissen ausgehende unvermeidbare Überflutung im urbanen Raum aufzuklären. Die Erfahrung zeigte, dass von der Bevölkerung ein weitaus höherer Überflutungsschutz erwartet wird, als durch städtische Entwässerungssysteme tatsächlich gegeben ist. Die Dimensionierung der Kanalisation erfolgt im wirtschaftlich und ingenieurstechnisch sinnvollen Rahmen entsprechend des

Arbeitsblatts DWA-A 118 aufgrund der örtlichen Starkregenextremwertstatistik, der Überflutungshäufigkeiten und der Überstauhäufigkeit (Tab. 2.2) (DWA, 2006). Angelehnt an diese Werte schlug Schmitt (2014) einen 7-stufigen dimensionslosen Starkregenindex (SRI) auf Basis der Wiederkehrzeiten von Niederschlägen von $T_n = 1$ a bis $T_n = 100$ a und der Anliegen "Bemessung", "Überstaufreiheit" und "Überflutungsschutz" vor (Tab. 2.3). Auf eine Berücksichtigung von Dauerstufen wurde dabei bewusst verzichtet, mit der Begründung, dass zu präzise Werte falsche Sicherheitsgedanken bewirken.

Tabelle 2.2 Empfohlene Werte zur Dimensionierung des Entwässerungssystems (Schmitt, 2014)

Bemessungs- regenhäufigkeit	Örtlichkeit/ Flächennutzung	Überflutungs- häufigkeit	Überstauhäufigkeit (Neuplanung)	Überstauhäufigkeit (Mindestleistungsfähigkeit)
1 in 1 a	ländliche Gebiete	1 in 10 a	1 in 2 a	-
1 in 2 a	Wohngebiete	1 in 20 a	1 in 3 a	1 in 2 a
1 in 5 a	Stadtzentren, Industrie- und Gewerbegebiete	1 in 30 a	seltener als 1 in 5 a	1 in 3 a
1 in 10 a	unterirdische Verkehrsanlagen, Unterführungen	1 in 50 a	seltener als 1 in 10 a	1 in 5 a

Tabelle 2.3 Zuordnung eines dimensionslosen SRI zu Wiederkehrintervallen (Schmitt, 2014)

Wiederkehrintervall T _n [a]	1	2	3	5	10	20	30	50	100
Starkregenindex	1	1	2	2	3	4	5	6	7

Schmitt (2015) machte auf die Einschränkung aufmerksam, dass die von Schmitt (2014) ausgeführte Methodik nur auf Messwerte von Einzelstationen angewandt werden könne. Das Ausmaß von Überflutungen hinge aber bedeutend vom räumlichen und zeitlichen Auftreten des Starkregenereignisses ab. Demzufolge wurden Ansätze zur Überarbeitung der SRI-Methodik vorgetragen, die dies mit einbeziehen würden. Die Einbindung der räumlichen Komponente sollte über Radardaten und die Gruppierung einzelner Rasterzellen zu "Umgebungen" erfolgen. Um die Extremität von Starkregenereignissen oberhalb einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren zu verdeutlichen, erweiterte Schmitt (2015) die Starkregenindexskala um 5 Stufen zum Starkregenindexkonzept SRI12. Dabei wurde von einer ortsgebundenen Kategorisierung zu einer ortsunabhängigen gewechselt und eine Tabelle für die Dauerstufen D = 15 min, 60 min, 2 h, 4 h und 6 h erstellt. Zur Berücksichtigung der zeitlichen Komponente erinnerte Schmitt (2015) an die Methodik von Grisa (2013), welcher Ereignissen von längerer Dauer, aber gleicher Wiederkehrzeit, höhere SRI zuordnete. Schmitt (2015) verzichtete aber auf eine Einbindung der Dauer, da dies die Dimension des SRI um ein Vielfaches erweitert hätte.

Da der ortsunabhängige Ansatz mit Begründung der Heterogenität des deutschlandweiten Starkregenaufkommens kritisiert wurde, nahm Schmitt (2016) den in Tabelle 2.3 vorgeschlagenen Ansatz für die SRI von 1 bis 7 wieder auf. Dazu sollten die SRI von 8 bis 12 ebenfalls ortsgebundenen

Werten entsprechen. Für deren Berechnung wurde die Regenhöhe bei $T_n=100$ a in der jeweiligen Dauerstufe als "Ankerwert" festgesetzt und mit Erhöhungsfaktoren multipliziert. Die Erhöhungsfaktoren wurden über praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags (PEN-Werte) von Verworn und Draschoff (2008) abgeleitet (Schmitt, 2016). Schmitt (2017) zog zur ortsspezifischen Anwendung der SRI die Starkregenextremwertstatistik KOSTRA-DWD-2010 des DWD heran (Malitz und Ertel, 2015). Anhand eines Beispiel-Rasterfelds wurden in einer Tabelle Regenhöhen der Dauerstufe D=15 min, 1 h, 2 h, 4 h und 6 h SRIs von 1 bis 7 zugeordnet. Schmitt (2017) setzte Erhöhungsfaktoren für die SRI von 8 bis 12 fest und plausibilisierte sie.

Krüger und Pfister (2016) griffen den mathematischen Ansatz von Grisa (2013) auf und modifizierten die Formel zu deren Anwendung auf die statistische Starkregenanalyse nach Arbeitsblatt DWA-A 531 (DWA, 2012). Darüber berechneten sie, im Gegensatz zu Grisa (2013), SRI-Kurven in Abhängigkeit der Dauer und der Niederschlagshöhe, für Dauerstufen von D = 5 min bis D = 6 h, sowie das Wiederkehrintervall $T_n = 1$ a. Mudersbach (2016) stellte in Anlehnung an Grisa (2013) einen ebenfalls mathematischen Ansatz zur Berechnung des SRI vor. Er definierte 11 SRI-Klassen zur Klassifikation von Starkregenereignissen bis zu Jährlichkeiten von 100 a und stellte eine Abhängigkeit zur Regendauer her. Dabei fällt die Jährlichkeit stärker ins Gewicht als die der Dauer. Dennoch werden somit kurzen Niederschlagsereignissen mit hohen Intensitäten, durch Zuweisung eines höheren SRI, auch ein höheres Gefahrenpotenzial zugeschrieben. Mudersbach (2016) zufolge ist dies für die Risikokommunikation von großer Bedeutung, da auch sehr kurze Ereignisse mit hohen Niederschlagsmengen zu großen Schäden führen können.

Schmitt et al. (2018) veröffentlichten 2018 ein einheitliches SRI-Konzept. Der Wertebereich wurde auf SRI von 1 bis 12 mit individueller Farbgebung festgelegt. Die SRI von 1 bis 7 sollen für die Wiederkehrzeiten von $T_n=1$ a bis 100 a über örtliche Starkregenextremwertstatistiken ermittelt werden. Die SRI von 8 bis 12 werden über Erhöhungsfaktoren entsprechend Schmitt (2017) und den Ankerwert bei SRI 7 und $T_n=100$ a berechnet, mit dem bewussten Verzicht auf Zuweisung konkreter Wiederkehrzeiten für SRI > 8. Die betrachteten Dauerstufen sollten entsprechend der wasserwirtschaftlichen Relevanz von 5 min bis 6 d reichen. SRI wurden zusätzlich gruppiert und Kategorien definiert ("Starkregen", "Intensiver Starkregen", "Außergewöhnlicher Starkregen", "Extremer Starkregen"). Die SRI-Zuordnung wird hier entgegen der Anmerkungen von Schmitt (2015) nur für Daten von Punktmessungen beschrieben. Zur leichteren und eindrücklicheren Kommunikation wurde eine Grafik ergänzt, die den Kategorien der gruppierten SRI eine urbane Überflutungsgefahr zuschreibt (Abb. 2.5).

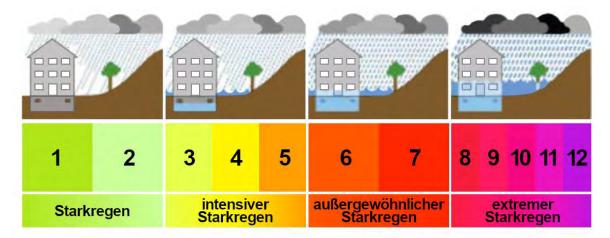


Abbildung 2.5 Skizzierte von der jeweiligen Starkregen-Kategorie ausgehende Überflutungsgefahr zur Risikokommunikation mit der Öffentlichkeit (Schmitt et al., 2018)

Die Stadt Hamburg hat den SRI-Ansatz in einer Live-Regenkarte umgesetzt, die in minimalen Zeitschritten von 5 min den Niederschlag in Echtzeit abbildet. Die Niederschlagsangaben basieren auf Radardaten des Deutschen Wetterdienstes in Kombination mit Bodenmessstationen für Rastergrößen von 500 m x 500 m. Die Niederschlagshöhen werden direkt einem SRI zugeordnet und in der Karte entsprechend der Niederschlagsintensität, in Analogie zu der von Schmitt et al. (2018) definierten Skala farblich wiedergegeben. Ergänzt wird die Skala durch Blautöne, die Niederschlag darstellen, der die Schwelle "Starkregen" nicht überschreitet, was für 90 % der Regenfälle in der Region der Fall ist (Abb. 2.6) (Hamburg Wasser, 2019).

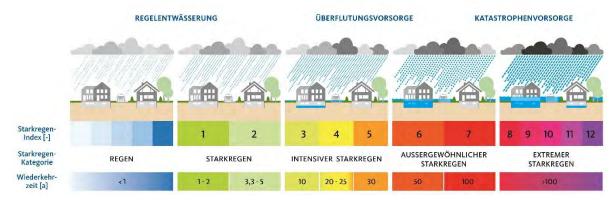


Abbildung 2.6 SRI-Skala der Stadt Hamburg in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit (Hamburg Wasser, 2019)

2.3 Modellierung im Rahmen des Starkregenmanagements

Die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) brachte 2016 den Leitfaden "Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg" heraus. Dieser soll der Ingenieurspraxis und kommunalen Einrichtungen als Arbeitsanleitung zum Umgang mit dem Thema Starkregen im urbanen Raum dienen. Enthalten sind Informationen und Anleitungen zur Gefährdungsund Risikoanalyse, mit dem Ziel der Schadensreduzierung (LUBW, 2016). Wird im Laufe dieser Arbeit von "Leitfaden" gesprochen, ist damit eben dieser gemeint.

Im Rahmen der Gefährdungsanalyse sollen gefährdete Bereiche im urbanen Raum infolge von Starkregen identifiziert werden. Dies erfolgt über die Modellierung ausgewählter Niederschlagsereignisse. Mit einem hydrologischen Modell bzw. Niederschlags-Abfluss-Modell wird die Menge des anfallenden Oberflächenabflusses ermittelt. Mit diesem Ergebnisdatensatz als Eingangsgröße wird anschließend die hydraulische Modellierung durchgeführt. Die Darstellung der Modellierungsergebnisse resultiert in Starkregengefahrenkarten (SRGK).

Auf die Gefährdungsanalyse folgt die Risikoanalyse. Dabei werden die in den SRGK visualisierten überflutungsgefährdeten Bereiche mit dem Schadenspotenzial verbunden. Das Schadenspotenzial setzt sich aus dem Wert und der Vulnerabilität eines betrachteten Objekts zusammen. Da die Risikoanalyse keinen zentralen Forschungsgegenstand dieser Arbeit darstellt, werden dazu keine weiteren Ausführungen folgen.

Dieses Kapitel wird einen kurzen Überblick zur hydrologischen und hydraulischen Modellierung liefern. Darauf folgen Ausführungen zur Gefährdungsanalyse. Im Zuge dessen werden SRGK und Gefahrenklassen tiefgehender behandelt.

2.3.1 Hydrologische Modellierung

Mit hydrologischen Modellen wird grundsätzlich der Zusammenhang zwischen über einem Gebiet gefallenen Niederschlag und dem daraus resultierenden Abfluss studiert. Über die Jahre wurden verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Strukturen entwickelt, die sich in ihrer Komplexität stark unterscheiden und folgend mit steigender Komplexität aufgelistet sind (Fohrer et al., 2016; Sitterson et al., 2017):

- 1. Black-Box-/ Empirische-Modelle
- 2. Grey-Box-/ Konzeptionelle-Modelle
- 3. White-Box-/ Physikalische-Modelle

Während viele Modelle ihrem Aufbau entsprechend klar einem dieser Modelltypen zugeordnet werden können, gibt es viele Modelle, die die Stärken aus allen drei Modelltypen vereinen und dennoch namentlich einem dieser Modelltypen zugeordnet werden (Beven, 2012). Je nach Anwendungsbereich, Fragestellung und verfügbaren Ressourcen eignet sich der eine oder der andere Modelltyp besser.

Mit Black-Box-Modellen wird das zu modellierende System stark vereinfacht. Sie setzen den System-Input und -Output in Beziehung und vernachlässigen dabei die im betrachteten Gebiet ablaufenden physikalischen Prozesse. Die Modellparameter müssen kalibriert werden, was anhand von gemessenen Daten erfolgt. Dementsprechend werden Black-Box-Modelle häufig auch datengetriebene Modelle genannt (Sitterson et al., 2017). Dabei können die ermittelten Parameter nur bedingt auf andere Untersuchungsgebiete übertragen werden (Guse et al., 2019). Entsprechend der Kalibrierung mittels Beobachtungsdaten sind Black-Box-Modelle stark von der Qualität der Eingangsdaten abhängig (Kokkonen et al., 2001).

White-Box-Modelle basieren im Gegensatz zu Black-Box-Modellen auf einem detaillierten Verständnis der in der Natur ablaufenden physikalischen Prozesse und werden dadurch auch als Prozess-basierte Modelle bezeichnet. Die Variablen des Modells sind messbar und stehen in funktionalem Zusammenhang mit Zeit und Raum. Sie bilden die komplexeste Gruppe der hydrologischen Modelle und benötigen viel Rechen- und Speicherkapazität, da große Mengen an flächigen Eingangsdaten benötigt werden (Devia et al., 2015; Sitterson et al., 2017). Ein Vorteil der umfassenden Datengrundlage ist, dass White-Box-Modelle in der Regel wenig bis keine Kalibrierung benötigen (Guse et al., 2019). Ein weiterer Vorteil ist, dass die Anpassung der Modellparameter nicht an Niederschlags- und Abflussdaten erfolgt, die unter anderen klimatischen Bedingungen aufgenommen wurden, als zu dem Zeitpunkt herrschen, der modelliert werden soll (Steinbrich und Weiler, 2012a).

Grey-Box-Modelle kombinieren Ansätze der Black-Box- und der White-Box-Modelle, indem physikalische hydrologische Prozesse mittels vereinfachter Gleichungen integriert werden. Sie kommen besonders dann zum Einsatz, wenn das betrachtete System in verschiedene Speicher aufgeteilt wird. Wie Black-Box-Modelle werden die Parameter über einen Kalibrierungsvorgang festgelegt (Sitterson et al., 2017).

Beispiele für Modelle, die breite Anwendung in Deutschland finden sind LARSIM (Bremicker, 2000) und WaSIM-ETH (Schulla, 1997). Sie können den Grey-Box-Modellen zugeordnet werden, weshalb sie ebenfalls kalibriert werden müssen (Kaiser et al., 2017). WaSIM-ETH kann für EZG-Größen von < 1 km² bis zu mehreren 10000 km² angewandt werden. Dies erfolgte häufig im alpinen Bereich. LARSIM dient mittlerweile unter anderem als Grundlage für die Hochwasservorhersage der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) Baden-Württemberg (LEG, 2019). Da Starkregenereignisse meist kleinskalige Phänomene sind, sind Modelle erforderlich, die diese kleinskaligen Prozesse in ihrer Variabilität abbilden können (Bremicker, 2000).

In dieser Arbeit wird mit dem physikalisch basierten Modell RoGeR (RunOff Generation Research) gearbeitet, das im Rahmen des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WaBoA) Projekts an der Professur für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg entwickelt wurde (Steinbrich und Weiler, 2012a; Steinbrich und Weiler, 2012b; Steinbrich und Weiler, 2012c; Professur für Hydrologie, 2019). Zu diesem Zeitpunkt wurde mit dessen Entwicklung eine Forschungslücke geschlossen, da

bislang kein Niederschlags-Abfluss-Modell in der Lage war Abflussbildungsprozesse ohne Kalibrierung – und somit auf andere EZG übertragbar – von der Plot- bis zur Mesoskale in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung wiederzugeben.

Die erste Version von RoGeR wurde 2014 unter dem Namen DROGen (**D**istributed **RunOff Gen**eration Model) veröffentlicht. Mittlerweile liegt RoGeR in vielen verschiedenen Versionen vor und wird kontinuierlich weiterentwickelt (Professur für Hydrologie, 2019):

Basisversion RoGeR: Abbildung der Abflussbildungsprozesse

• RoGeR dynamo: Erweiterung von RoGeR um ein 2D-hydraulischen Routingverfahren

• RoGeR WB Urban: Weiterentwicklung zu einem Wasserhaushaltsmodell mit

Berücksichtigung urbaner Strukturen

• RoGeR WB 1D: Aus RoGeR WB Urban abgeleitete 1-D-Version zur Ermittlung des

langjährigen Wasserhaushalts urbaner und nicht urbaner Standorte

Ein entscheidender Vorteil von RoGeR ist, dass es vom Anwender nicht kalibriert werden muss, da die Parametrisierung des Modells aufgrund von flächigen Daten und Expertenwissen erfolgte. Die Ergebnisvalidierung erfolgte anhand von 13 mesoskaligen EZG und 36 beobachteten Niederschlags-Abfluss-Ereignissen, wie auch 7 Großberegnungsversuchen (Steinbrich et al., 2015). In dieser Arbeit wird mit der Erweiterung RoGeR dynamo gearbeitet. Eine detailliertere Erläuterung des Modells erfolgt in Kapitel 4.5.1.

2.3.2 Hydraulische Modellierung

Die räumlich differenzierte Analyse zur Identifikation besonders gefährdeter Bereiche im Starkregenfall wird mit hydraulischen Modellen durchgeführt. Gemäß dem Leitfaden kann dies mittels verschiedener Verfahren welche sich in Hinsicht auf die Grundlagendaten, erfolgen, benötigten Softwareanforderungen, die Aussagekraft der Ergebnisse wie auch den Aufwand und die Komplexität der Bearbeitung unterscheiden. Die momentan zwar aufwändigste, gleichzeitig jedoch aussagekräftigste Methode ist die zweidimensionale, hydraulische und instationäre Modellierung. Sie ermöglicht die Darstellung von Fließwegen, die wild abfließendes Wasser im Starkregenfall bildet und liefert Ergebnisse Strömungsverhältnissen, Fließgeschwindigkeiten, Wasserspiegellagen Überflutungstiefen (LUBW, 2016).

Zur 2D-hydraulischen-Modellierung stehen verschiedene die Methoden zur Verfügung, Ergebnisse unterschiedliche liefern. Differenziert hydrodynamischen wird zwischen Kanalnetzmodellen, Oberflächenabflussmodellen und gekoppelten Kanalnetz-Oberflächenabflussmodellen (Abb. 2.7). Die Modellierung kann dabei gekoppelt oder ungekoppelt erfolgen. Die zur Modellierung verwendete Niederschlagsbelastung kann Naturregen oder Modellregen

sein. In Merkblatt DWA-M 119 wird jedoch die Verwendung von Modellregen, als einfacher Blockregen oder als Euler-Regen mit variablen Intensitätsverläufen empfohlen (DWA, 2016).

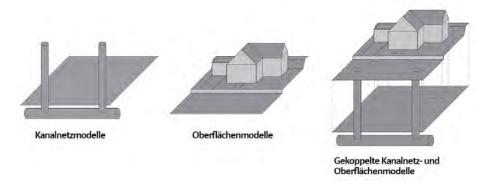


Abbildung 2.7 Verschiedene Modellansätze zur 2D-hydraulischen Modellierung (verändert, HSB, 2017)

Um möglichst realistische Ergebnisse zu erzielen, müssen urbane, hydraulische Modelle kalibriert und validiert werden. Die hierfür benötigten Daten sind jedoch besonders in kleinen EZG selten vorhanden und schwer zu erheben. Wenn, dann liegen Daten zu nachträglich ermittelten Überflutungstiefen über Marken an Häusern oder anderen Strukturen vor. Die genauen Zeitpunkte, zu denen die Wasserstände während des Ereignisses auftraten, sind dabei jedoch meist nicht bekannt. Diese Information ist für die Modellkalibrierung von essentieller Wichtigkeit (Lo et al., 2015).

Beispiele für gängige Hydraulikmodelle sind Hydro_AS-2D, InfoWorks_ICM, MIKE 21, SOBEK, FloodArea und Flow 2D (Gilli, 2019). Wie im vorigen Kapitel erwähnt, wurde RoGeR um einen 2D-hydraulischen Ansatz erweitert. Da in dieser Arbeit schon die hydrologische Modellierung in RoGeR durchgeführt wird, wird auch die hydraulische Modellierung mit RoGeR durchgeführt.

2.3.3 Oberflächenabflussbildungsprozesse

Die in dieser Arbeit im Fokus stehenden kurzen, lokal begrenzten Starkregenereignisse zeichnen sich meist durch hohe Niederschlagsintensitäten aus, die zu einer Überschreitung der Infiltrationskapazität des Bodens und somit zur Ausbildung von HOA führen. Im Starkregenereignisfall dominiert HOA gegenüber den anderen Abflusskomponenten, Sättigungsflächenabfluss (SFA), Zwischenabfluss (ZA) und Tiefenperkolation (TP) (Scherrer, 2006; Steinbrich et al., 2016b). Da die hydraulische 2D-Modellierung demnach vordergründig das Abflussverhalten des Oberflächenabflusses abbildet, soll hier nur auf die Abflusskomponente HOA eingegangen werden.

Die Menge des während eines Starkregenereignisses gebildeten Oberflächenabflusses unterliegt dem Einfluss folgender Parameter: Vorereignisbodenfeuchte, Bodeneigenschaften, Landnutzung, Gefälle, Niederschlagssumme, Niederschlagsdauer und Niederschlagsintensität (Maurer, 1997; Grillakis et al., 2016; Steinbrich et al., 2018).

Laut Marchi et al. (2010) begünstigen besonders geringdurchlässige Böden und hohe Ereignisvorfeuchten die Bildung von HOA (Marchi et al., 2010). Grillakis et al. (2016) zufolge stellt die Bodenfeuchte die wichtigste Einflussgröße der Oberflächenabflussbildung dar.

Apel et al. (2016) modellierten anhand von verschiedenen künstlich erzeugten 1-stündigen Niederschlagsbelastungen verschiedene Szenarien der Überflutungsgefahr. Dabei variierte der Intensitätsverlauf und die räumliche Verteilung. Im Vergleich der somit modellierten Überflutungstiefen mit Überflutungstiefen die mit einer gleichmäßigen Überregnung des EZGs modelliert wurden, stellten sie fest, dass die ausgebildeten Überflutungstiefen stark von der Niederschlagsintensität und der räumlichen Verteilung abhängen.

2.3.4 Gefährdungsanalyse

2.3.4.1 Starkregengefahrenkarten

Starkregengefahrenkarten (SRGK) stellen die von einem Starkregenereignis durch wild abfließenden Oberflächenabfluss ausgehende Überflutungsgefahr über die betrachtete Fläche differenziert dar. Abgebildet ist abfließendes Niederschlagswasser, das dem Gefälle und der Struktur der Geländeoberfläche entsprechend Fließwege zum Geländetiefpunkt oder zum oberirdischen Gewässer bildet. Damit unterscheiden sie sich von Hochwassergefahrenkarten (HWGK). Diese basieren auf gewässergebundenen, statistischen, hydrologischen Abflusskennwerten. Dabei wird die Jährlichkeit der Ausuferung und Überflutung eines Gewässers mit einem EZG > 10 km² dargestellt (Steinbrich et al., 2015). Den in den SRGK abgebildeten Überflutungsflächen werden im Gegensatz dazu keine Jährlichkeiten zugeordnet. Demnach sind diese im rechtlichen Sinne nach § 76 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und § 65 Wassergesetz für Baden-Württemberg (WG) keine Überschwemmungsgebiete (LUBW, 2016).

Der Leitfaden (LUBW, 2016) gibt als Grundlage für die einheitliche Erstellung der SRGK die Verwendung von Oberflächenabflusskennwerten (OAK) vor. Diese wurden am Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg flächendeckend für ganz Baden-Württemberg unter Anwendung des Modells RoGeR ermittelt. Generiert wurden Datensätze zum Oberflächenabflussauftreten für die Szenarien "seltenes, außergewöhnliches und extremes Oberflächenabflussereignis", welchen jeweils extreme, lokale Niederschlagsereignisse mit der Dauer von einer Stunde und Wiederkehrintervallen von 30 und 100 Jahren, sowie einem "Extrem"-Szenario zugrunde liegen. Dabei kann man sich den Niederschlag, der zur Berechnung der OAK ins Modell einfloss, als eine einzelne Starkregenzelle mit räumlich differenzierten Niederschlagshöhen der entsprechenden Jährlichkeit des modellierten Szenarios vorstellen, die ganz BW abdeckt. Den OAK selbst kann keine Jährlichkeit zugeordnet werden, da diese, abgesehen vom Niederschlag, noch von weiteren Faktoren beeinflusst werden, wie den Vorfeuchtebedingungen, den lokalen Bodeneigenschaften und der Landnutzung. Dementsprechend stimmt die Jährlichkeit der Abflüsse nicht mit der Jährlichkeit der Niederschläge überein (Steinbrich et al., 2016b). Die SRGK dürfen laut

Leitfaden (LUBW, 2016) nicht für Gebiete größer 5 km² berechnet werden. Dies rührt vom kleinräumigen Auftreten konvektiver Niederschlagsereignisse her. Die Berechnung größerer Gebiete würde zu einer Akkumulation von Abflüssen und zur Überschätzung von Überflutungshöhen und -ausbreitungen führen (UM, 2019).

Die Modellierungsdauer sollte nicht nur das Niederschlagsereignis abdecken, sondern um eine Stunde Nachlaufzeit verlängert werden. Ohne Nachlaufzeit würde oberflächig abfließendes Wasser nach Niederschlagsende unberücksichtigt bleiben, das sich eventuell in Tiefpunkten sammeln und somit die Überflutungsgefahr erhöhen würde (LUBW, 2016; HSB, 2017). Die Kanalisation muss in die hydraulische Modellierung nicht zwangsläufig mit einbezogen werden, da dies einen hohen Mehraufwand mit sich bringt. Im Fall eines "seltenen" Ereignisses können Oberflächenabflussverluste durch die Kanalisation über Muldenspeicher oder einen Abschlag der Beregnung grob berücksichtigt werden. Im Fall von "außergewöhnlichen" und "extremen" Ereignissen sind die Wassermengen so groß, dass die Kanalisation keine Rolle mehr spielt (LUBW, 2016).

Der grafische Informationsgehalt der SRGK bezieht sich neben der Überflutungsausdehnung und den Überflutungstiefen (ÜT) auch auf die tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten (FG). Dabei sind besonders die über das gesamte Ereignis erreichten Maximalwerte von Interesse. Diese sollen gruppiert und farblich differenziert dargestellt werden. Abbildung 2.8 zeigt die hierfür im Leitfaden vorgeschlagene Musterlegende (LUBW, 2016).



Abbildung 2.8 Beispiellegende für die Darstellung von ÜT und FG in SRGK (LUBW, 2016)

2.3.4.2 Gefahrenklassen

Laut Smith und McLuckie (2015) kann die größte Gefahr nicht über die separate Betrachtung der höchsten Wasserstände oder der höchsten Abflüsse identifiziert werden. Den größten Schaden führen sie auf eine Kombination aus ÜT und FG zurück. Loat und Petrascheck (2001) bezeichnen deren Produkt als Anpralldruck und definieren ihn als maßgebenden Schadensparameter. Durch die erodierende Wirkung können Untergründe instabil werden und Baufundamente untergraben werden. Die Kraft des fließenden Wassers vermag es Menschen und Autos mitzureißen. Im Wasser mitgeführte Fracht erhöht die zerstörende Wirkung.

Um die von der Kombination aus ÜT und FG ausgehende Gefahr zu ermitteln, sollen Gefahrenklassen gebildet werden. Dies erfolgt über das In-Beziehung-Setzen der kombinierten ÜT und FG mit der potenziellen Schädigung von Personen und Objekten. In Merkblatt DWA-M 119 (DWA, 2016) wird Wasserstandsklassen eine Überflutungsgefahr von gering bis sehr hoch und eine Gefahrenklasse von 1 bis 4 zugeordnet (Tab. 2.4). Dabei wird darauf hingewiesen, dass sich diese nur auf das Eindringen von Wasser in Privatgrundstücke und Gebäude bezieht und nicht auf die Verkehrssicherheit oder die Unversehrtheit von Personen.

Tabelle 2.4 In Merkblatt DWA-M 119 vorgeschlagene Zuordnung von Wasserständen zu Gefahrenklassen (verändert, DWA, 2016)

Wasserstand	Überflutungsgefahr	Gefahrenklasse
< 10 cm	gering	1
10 cm - 30 cm	mäßig	2
30 cm - 50 cm	hoch	3
> 50 cm	sehr hoch	4

Im Leitfaden (LUBW, 2016) werden zwar keine Gefahrenklassen ausgewiesen, dafür erfolgt eine Einteilung der ÜT in Gruppen und die Benennung der von ihr ausgehenden potenziellen Gefahr für Personen, Infrastruktur und Objekte (Tab. 2.5). Die gleiche Einteilung und Gefahrenabschätzung wurde für FG vorgenommen (Tab. 2.6). Eine Verbindung von ÜT und FG erfolgte bei der Gefahrenzuteilung nicht.

Tabelle 2.5 Potenziell für Leib, Leben, Infrastruktur und Objekte bestehende Gefahr in Abhängigkeit der ÜT (LUBW, 2016)

	Abhangigken der OT (LODW, 2010)	
Überflutungs-	Potenzielle Gefahren	Potenzielle Gefahren
tiefe	für Leib und Leben	für Infrastruktur und Objekte
5 – 10 cm	 Volllaufende Keller können das Öffnen von Kellertüren gegen den Wasserdruck verhindern Eingeschlossenen Personen droht das Ertrinken 	 Überflutung und Wassereintritt durch ebenerdige Kellerfenster oder ebenerdige Lichtschächte von Kellerfenstern Wassereintritt in tieferliegende Gebäudeteile, z.B. (Tief-)Garageneinfahrten Wassereintritt durch ebenerdige Türen
		mit möglicher Schädigung von Inventar
10 – 50 cm	 s.o. für (Klein-)Kinder besteht die Gefahr des Ertrinkens bereits bei niedrigen Überflutungstiefen 	 Wassereintritt auch durch höher gelegene Kellerfenster möglich
50 – 100 cm	 s.o. für (Klein-)Kinder besteht die Gefahr des Ertrinkens bereits bei niedrigen Überflutungstiefen 	 Wassereintritt auch bei erhöhten Eingängen möglich
> 100 cm	 Gefahr für Leib und Leben bei statischem Versagen und Bruch von Wänden Gefahr des Ertrinkens für Kinder und Erwachsene 	Mögliches Versagen von Bauwerksteilen

Tabelle 2.6 Potenziell für Leib und Leben und Infrastruktur und Objekte bestehende Gefahr in Abhängigkeit der FG (LUBW, 2016)

Flieβ-	Potenzielle Gefahren	Potenzielle Gefahren
geschwindigkeit	für Leib und Leben	für Infrastruktur und Objekte
> 0,2 - 0,5 m/s	Gefahr für ältere, bewegungseingeschränkte Bürger oder Kinder beim Queren des Abflusses	 Versagen von Türdichtungen durch erhöhten Druck
> 0,5 – 2 m/s	 Gefahr für Leib und Leben beim Versuch, sich durch den Abflussstrom zu bewegen 	 Möglicher Bruch von Wänden durch Kombination von hohen statischen und dynamischen Druckkräften
> 2 m/s	 Gefahr für Leib und Leben bei Versagen von Bauwerksteilen Gefahr durch mitgeführte, größere Feststoffe (z.B. Container, Auto, Baumstamm etc.) Versagen von Bauelementen in Folge von Unterspülung 	 Mögliches Versagen von Bauwerksteilen durch hohe dynamische

Smith et al. (2014) führten eine Literaturrecherche durch und definierten Gefahrenklassen von H1 bis H5 für Kombinationen aus ÜT und FG in Bezug auf die Gefährdung von Menschen, Fahrzeugen und Gebäuden. Visualisiert wurden die Ergebnisse in Gefahrenkurven (Abb.2.9). Mit der Ausweisung von Gefahrenklassen verfolgten sie das Ziel, Gefahren eindeutiger benennen und zuordnen zu können. Dies dient der Vereinfachung der anschließend auszuführenden Risikoanalyse wie auch der Erstellung eines Handlungskonzepts für den Ereignisfall. Ein Beispiel einer räumlichen Visualisierung der ermittelten Gefahrenklassen ist in Abbildung 2.10 gegeben. Smith und McLuckie (2015) wandten die Gefahrenklassen auf Ergebnisse einer 2D-hydraulischen Modellierung an und übertrugen diese auf die Karte (Abb. 2.10, rechts).

Tabelle 2.7 Übersicht der zur Erstellung der Gefahrenkurven zugrundeliegenden Grenzwerte (übersetzt, Smith et al., 2014)

Gefahrenklassen	Klassengrenzen (ÜT und FG in Kombination) [-]	Überflutungstiefe (ÜT) [m]	Fließgeschwindigkeit (FG) [m/s]
H1	ÜT x FG ≤ 0,3	0,3	2,0
H2	$\ddot{\text{UT}} \times \text{FG} \leq 0.6$	0,5	2,0
Н3	$\ddot{\text{UT}} \text{ x FG} \leq 0.6$	1,2	2,0
H4	$\ddot{\mathrm{U}}\mathrm{T} \; \mathrm{x} \; \mathrm{FG} \leq 1,0$	2,0	2,0
H5	$\ddot{\text{UT}} \text{ x FG} \leq 4.0$	4,0	4,0
Н6	$\ddot{\text{UT}} \text{ x FG} \leq 4,0$	-	-

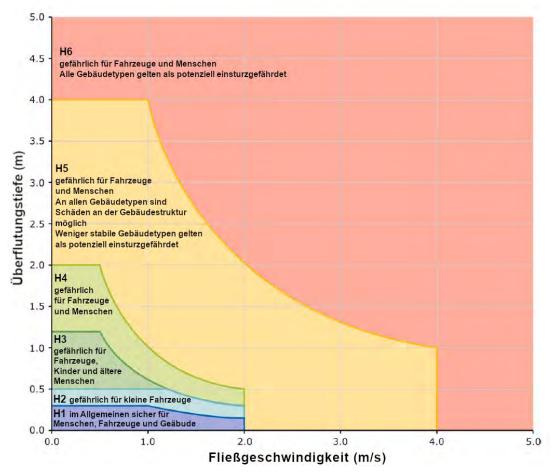


Abbildung 2.9 Gefahrenkurven bezogen auf die für Menschen, Fahrzeuge und Gebäude potenzielle Gefahr durch verschiedene Kombinationen aus ÜT und FG (übersetzt, Smith et al., 2014)

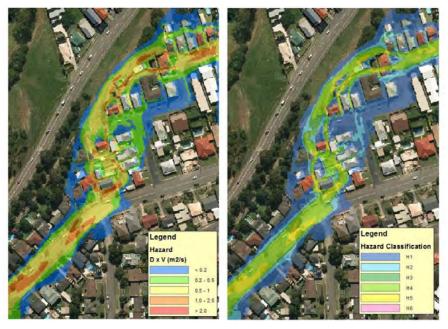


Abbildung 2.10 Links: Produkt aus modellierten FG und ÜT; Rechts: Gefahrenklassen Zuordnung (Smith und McLuckie, 2015)

3 Problemstellung und Zielsetzung

Die Stadt Reutlingen arbeitet seit 2002 kontinuierlich an einem Überflutungsschutzkonzept, da sie in der Vergangenheit von Starkregenereignissen getroffen wurde, die mit der Bildung von großen Mengen an Oberflächenabfluss einhergingen. Die Niederschläge zeichneten sich durch hohe Jährlichkeiten aus, die oberhalb derer lagen, die zur Bemessung der Kanalisation angesetzt werden. Die Folgen waren Hochwasser an der Echaz, einem Fluss der quer durch das Stadtgebiet verläuft, sowie lokale Überflutungen, die Schäden an Objekten und Infrastruktur verursachten. Das Teileinzugsgebiet der Echaz mit Auslass unmittelbar nach der Stadtgrenze Reutlingens (flussabwärts), setzt sich aus kleineren schnell-reagierenden EZG zusammen. Somit kann sich Starkregen im Reutlinger Stadtgebiet, als Hochwasser in Verbindung mit Fließgewässern, wie auch als flächige Überflutungen durch wildabfließendes Wasser äußern.

Vergleicht man die in Reutlingen vergangenen, schadenverursachenden Niederschlagsereignisse jedoch mit Extremereignissen aus dem Jahr 2016 in Braunsbach und Simbach, relativiert sich deren Ausmaß. Dabei können sich Extremereignisse dieser Dimension potenziell überall ereignen (Winterrath et al., 2018). Die genaue Vorhersage des räumlichen und zeitlichen Eintretens von Starkniederschlägen ist jedoch zum aktuellen Stand nicht möglich (Becker, 2016; Winterrath et al., 2018). Da die Vorwarnzeiten dementsprechend kurz sind und keine Zeit für kurzfristige Schutzmaßnahmen einräumen, müssen zusätzlich zu Handlungskonzepten für den akuten Unwetterfall, präventive Maßnahmen ergriffen werden, um das Schadensrisiko im Voraus zu minimieren (Winterrath et al., 2018).

Im Leitfaden zum kommunalen Starkregenrisikomanagement in BW (LUBW, 2016) wird zur Identifikation besonders überflutungsgefährdeter Bereiche die Erstellung von SRGK vorgegeben. In Merkblatt DWA-M 119 wird die Anwendung eines Starkregenindex (SRI) zur verbesserten Risikokommunikation mit der Bevölkerung empfohlen (DWA, 2016). Schmitt et al. (2018) veröffentlichten zu diesem Zweck ein 12-stufiges SRI-Konzept. Dabei sollen Starkniederschlagsereignisse über die drei Parameter Dauer, Jährlichkeit und Regenhöhe charakterisiert und entsprechend ihrer Intensität einem Index zwischen 1 und 12 zugeordnet werden. Die Indices wurden zusätzlich gruppiert und entsprechend ihrer Schwere in vier Kategorien von "Starkregen" bis "Extremer Starkregen" eingeteilt. Diesen wurden wiederum in einer vereinfachten Grafik Überflutungsgefahren zugeordnet. Da die Zuordnung der SRI zu Starkregenereignissen jedoch nur über Niederschlagscharakteristika erfolgt, ist er ein rein pluvialer Index, der keine Aussagen über die Oberflächenabflussbildung zulässt. EZG können sich aufgrund ihrer Eigenschaften sehr in ihrer Abflussbildung unterscheiden und dementsprechend stark voneinander abweichende Reaktionen auf Niederschlagsereignisse aufweisen. Die aktuelle SRI-Methodik trägt diesem Sachverhalt keine Rechnung. Dementsprechend soll in dieser Arbeit untersucht werden, inwiefern der postulierte Zusammenhang zwischen SRI und Überflutungsgefahr gegeben ist.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Beantwortung der Frage, ob der SRI eine Aussage über die von einem Starkregenereignis ausgehende Überflutungsgefahr zulässt, oder ob er einer ortsspezifischen Anpassung an die hydrologischen und hydraulischen Begebenheiten unterliegen müsste. Die Bejahung des Letzteren müsste demnach mit der Umbenennung des rein pluvialen SRI, oder mit der namentlichen Abgrenzung eines neu zu schaffenden, hydraulischen oder hydrologischen Index einhergehen.

Dazu lassen sich folgende Fragestellungen formulieren:

- Wie erfolgt die Niederschlagscharakterisierung mittels der aktuellen SRI-Methodik und welche Information ist enthalten?
- Reagieren verschiedene EZG unterschiedlich auf identische Niederschläge des gleichen SRI?
- Lösen verschiedene Niederschläge, die dem gleichen SRI zugeordnet wurden, in ein und demselben EZG die gleiche Reaktion aus?

Zu deren Erörterung sollen drei unterschiedliche EZG, innerhalb der Stadtgrenzen von Reutlingen, auf ihre Reaktion auf unterschiedliche Niederschlagsszenarien hin untersucht werden. Die Szenarien ergeben sich aus zwei ausgewählten, in der Vergangenheit im Reutlinger Stadtgebiet niedergegangenen Starkregenereignissen. Jedem Szenario soll entsprechend der SRI-Methodik nach Schmitt et al. (2018) ein SRI zugeordnet werden. Unter Anwendung des Modells RoGeR, sollen für jedes EZG und Szenario ÜT und FG mittels einer simultanen hydrologischen und hydraulischen Modellierung ermittelt und ausgewertet werden. Um die in den EZG, als Reaktion auf die Szenarien, entstandene Gefahr vergleichen zu können, werden den ÜT und FG schlussendlich Gefahrenklassen zugeordnet.

4 Methoden und Vorgehensweise

Das Kapitel "Methodik und Vorgehensweise" besteht aus 5 Komponenten. Im ersten und zweiten Kapitel werden die betrachteten Untersuchungsgebiete und Niederschlagsereignisse beschrieben, um im dritten Kapitel die Kriterien zu deren Auswahl auszuführen. Kapitel vier behandelt die Methodik zum Starkregenindex (SRI) und Kapitel fünf die Ereignismodellierung mit RoGeR. Abbildung 4.1 bietet eine Übersicht über die einzelnen Komponenten der Methodik und Vorgehensweise. Besonders die einzelnen Schritte der Kapitel vier und fünf werden hier zusammengefasst dargestellt.

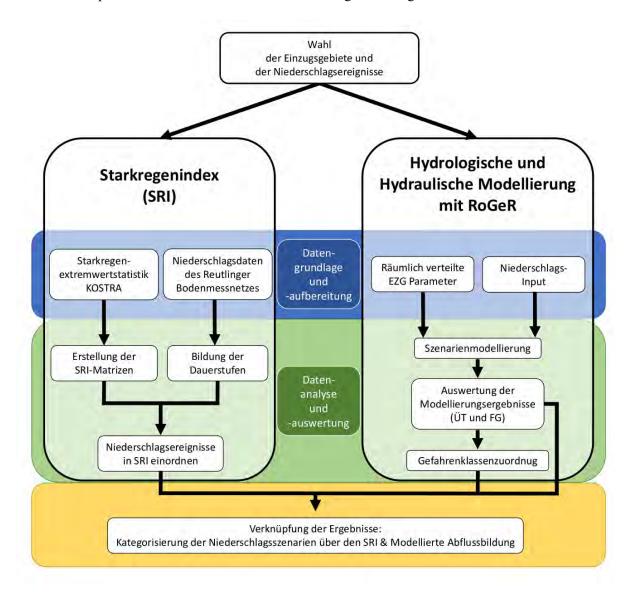


Abbildung 4.1 Übersicht zum Vorgehen in der Methodik

4.1 Beschreibung der Untersuchungsgebiete

Die in dieser Arbeit analysierten Untersuchungsgebiete liegen innerhalb der Verwaltungsgrenzen der Stadt Reutlingen, die sich aus der Kernstadt Reutlingen und 12 umliegenden Gemeinden zusammensetzten (Abb.4.2). Die gesamte Gemarkungsfläche umfasst ca. 87 km². Reutlingen liegt im Zentrum Baden-Württembergs und grenzt im Südosten an den Albtrauf. Dieser bildet die nord-westliche Abbruchkante der Schwäbischen Alb. Mit ihrer Fortsetzung, der Fränkischen Alb, bildet sie das größte Karstgebiet Deutschlands (Villinger, 1997). Reutlingen selbst ist geologisch überwiegend durch das Mitteljura geprägt. Der größte durch Reutlingen fließende Fluss ist die Echaz. Sie entspringt in einer Karstquelle in Honau und fließt von Südost nach Nordwest. Sie mündet bei Kirchentellinsfurt in den Neckar (Anhang 1). Ein Pegel zur kontinuierlichen Abflussmessung ist außerhalb der Stadt Reutlingen in Wannweil installiert.

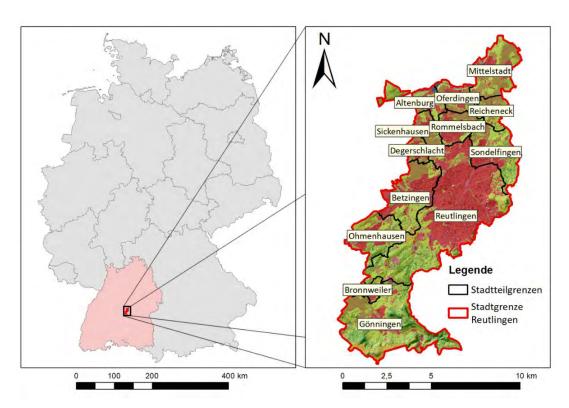


Abbildung 4.2 Links: Lage der Stadt Reutlingen in Baden-Württemberg (BKG, 2011)
Rechts: Stadt Reutlingen mit Stadtteilen (Siedlungsgebiete in Rot)

Eine Besonderheit des Reutlinger Stadtgebiets ist ein außergewöhnlich dichtes Bodenniederschlagsmessnetz, das zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Niederschlagsdaten in Echtzeit liefert. Begonnen wurde im Mai 2015 mit der Installation von zehn Niederschlagsmessstationen (Nd.-Stationen) (Abb. 4.3, Stationen 1-7 und 9-11). Im April 2015 folgten zwei weitere (8 und 12). Mit nun insgesamt zwölf Niederschlagsmessstationen kommt auf ca. 7 km² eine Niederschlagsmessstation. Die räumliche Auflösung des Bodenmessnetzes des DWD liegt vergleichsweise bei ca. 100 km². Deren zeitliche Auflösung liegt zum Großteil bei täglichen Werten (Becker, 2016).

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Analysen wurden 3 (EZG) ausgesucht, die Siedlungsflächen innerhalb der Reutlinger Stadtgrenze umschließen. Diese sind das EZG Zentrum Achalm (EZG ACH), das EZG Zentrum Nord (EZG NO) und das EZG Gönningen (EZG GOE). Die detailliertere Beschreibung der EZG ist in den folgenden Kapiteln zu finden. Die enthaltenen Grafiken der EZG wurden mit ArcGIS erstellt. Für einen Großteil der Karten wurden Eingangsdaten der Modellierung mit RoGeR verwendet. Deren Herkunft ist in Kapitel 4.5.1 erläutert. Wurden Daten aus anderen Quellen verwendet wurde dies unterhalb der entsprechenden Grafik vermerkt.

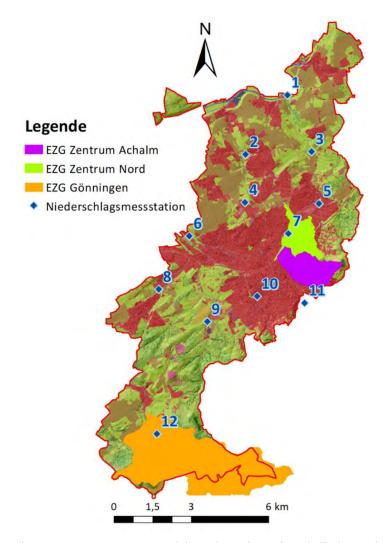


Abbildung 4.3 Lage der EZG ACH, NO, GOE und der Nd.-Stationen innerhalb der Stadt Reutlingen (Datenquelle: Stadt Reutlingen, 2019; RoGeR Eingangsdaten)

4.1.1 EZG Zentrum Achalm

Das EZG ACH liegt im Osten des Stadtgebiets Reutlingen und hat eine Fläche von 2,16 km². Im Norden grenzt es an das EZG NO. Es umschließt das Stadtzentrum der Kernstadt Reutlingen. Die dominierende Landnutzungsklasse sind versiegelte Flächen (83,5 %), gefolgt von Grünland (6 %) und komplexen Parzellenstrukturen (2,6 %). Mit 33,2 % ist der Versieglungsgrad von > 20 bis 30 % am stärksten im Gebiet vertreten. Am zweitstärksten vertreten sind Versiegelungsgrade von über 90 % (29 %), gefolgt

von Versiegelungsgraden von > 0 bis 10 % (12,5 %) (Abb. 4.4 und Tab. 4.1). Im Osten, ebenfalls an der Flanke der Achalm, entspringen zwei Fließgewässer, die in Dolen unterhalb des Stadtzentrums der Echaz zugeleitet werden.

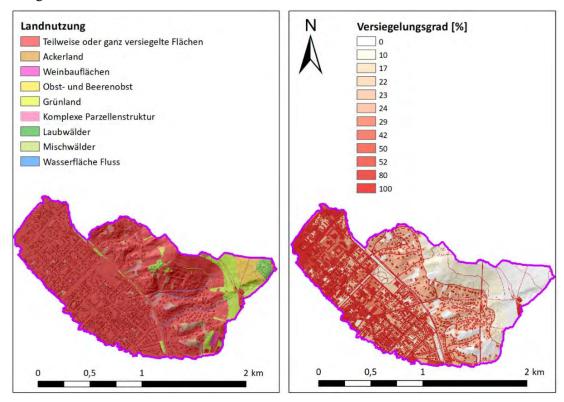


Abbildung 4.4 Karten zur Landnutzung und zum Versiegelungsgrad im EZG ACH (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten)

Tabelle 4.1 Prozentuale Anteile der Landnutzungsklassen an der gesamten EZG-Fläche und der Versiegelungsgrade an der versiegelten Fläche des EZGs ACH

Landnutzung	Anteil an der EZG-Fläche [%]	Versiegelungsgrad	Anteil an der versiegelten EZG-Fläche [%]
Teilweise oder ganz	83,5	> 0-10	12,5
versiegelte Flächen	05,5	> 10 – 20	0,5
Grünland	6 > 20 – 30		33,2
Komplexe Parzellenstruktur	2,6	> 30 – 40	0
Mischwälder	4	> 40 - 50	1,3
Obst- und Beerenobst	2,2	> 50 - 60	2,7
Laubwälder	0,9	> 60 - 70	0
Wasserfläche Fluss	0,4	> 70 - 80	4,3
Weinbauflächen	0,3	> 80 – 90	0
Ackerland	0,1	> 90	29

Der Höhenunterschied im EZG beträgt 270 m. Die durchschnittliche Geländehöhe liegt bei 416 m. Der tiefste Punkt liegt mit 373 m ü. NN im Westen des EZGs. Der höchste Punkt liegt mit 643 m ü. NN im Osten an der Flanke der Achalm, einem Zeugenberg der Schwäbischen Alb. Dementsprechend sind die höchsten Gefälle im Osten des EZGs. Die Neigung des EZGs verläuft von Ost nach West bis zur Mitte des EZGs. Ab hier verläuft das Gefälle von Südost nach Nordwest. Das durchschnittliche Gefälle im gesamten EZG beträgt 15,5 %. Das durchschnittliche Gefälle auf versiegelten Flächen beträgt 13,1 %.

Geologisch ist das EZG von tonigen Gesteinen des Mitteljuras geprägt. Der Boden ist zum Großteil ein mittel schluffiger Ton (Tu3) (Abb. 4.5).

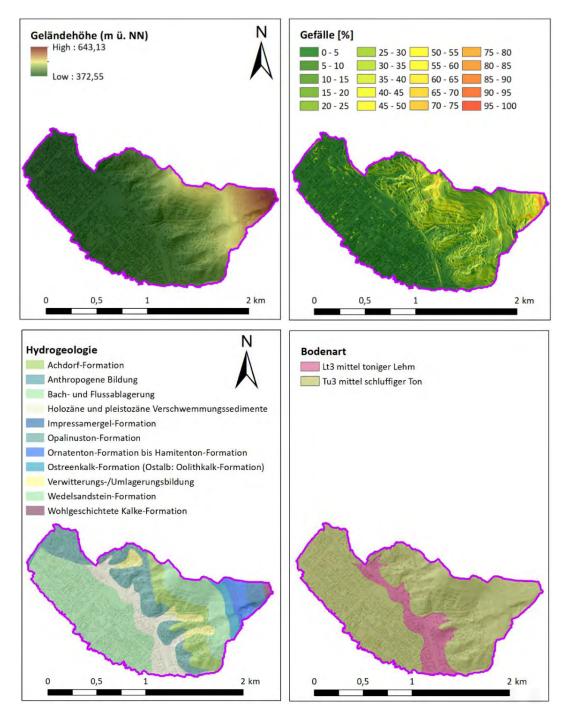


Abbildung 4.5 Karten zu Geländehöhe, Gefälle, Hydrogeologie und Bodenart im EZG ACH (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten; Hydrogeologie: LGRB)

4.1.2 EZG Zentrum Nord

Das kleinste untersuchte EZG ist das EZG NO mit einer Fläche von 1,68 km². Im Süden grenzt es an das EZG ACH. Mit 87 % versiegelter Fläche ist es von allen EZG am stärksten versiegelt. Die zweit- und dritthäufigsten Landnutzungsklassen sind komplexe Parzellenstrukturen (5,8 %) und Grünland (4,7 %). Versieglungsgrade zwischen > 20 und 30 % sind mit 59,1 % am häufigsten im Gebiet vertreten. Die zweit- und dritthäufigsten Versiegelungsgrade sind > 90 % mit 38,7 % und > 40 bis 50 % mit 16,3 % (Abb. 4.6 und Tab. 4.2).

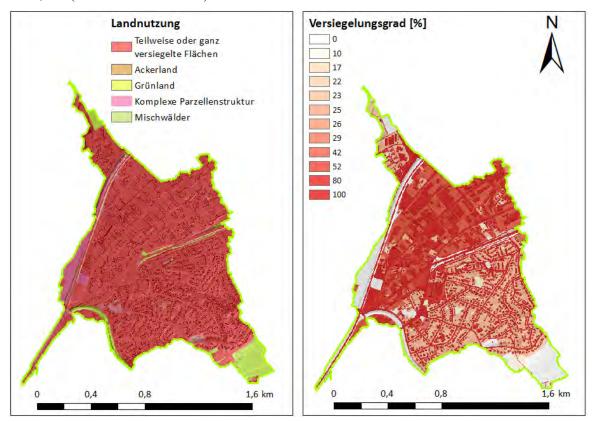


Abbildung 4.6 Karten zur Landnutzung und zum Versiegelungsgrad im EZG NO (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten)

Tabelle 4.2 Prozentuale Anteile der Landnutzungsklassen an der gesamten EZG-Fläche und der Versiegelungsgrade an der versiegelten Fläche des EZGs NO

Landnutzung	Anteil an der EZG-Fläche [%]	Versiegelungsgrad	Anteil an der versiegelten EZG-Fläche [%]
Teilweise oder ganz versiegelte Flächen	87	> 0 - 10 > 10 - 20	2,1 0,8
Komplexe Parzellenstruktur	5,8	> 20 - 30	59,1
Grünland	4,7	> 30 – 40	0
Mischwälder	2,4	> 40 - 50	16,3
Ackerland	< 1	> 50 - 60	6,2
		> 60 – 70	0
		> 70 - 80	6,2
		> 80 – 90	0
		> 90	38,7

Der Höhenunterschied im EZG NO liegt bei 162 m, ca. 100 m weniger als in EZG ACH. Die durchschnittliche Geländehöhe beträgt 405 m. Der höchste Punkt befindet sich mit 535 m ü. NN im Südosten des EZGs an einer Flanke der Achalm. Der niedrigste Punkt liegt im Südwesten des EZGs auf einer Höhe von 373 m ü. NN. Das durchschnittliche Gefälle im gesamten EZG beträgt 9,7 % und auf den versiegelten Flächen 8,5 %. Der südöstliche Teil des EZGs ist von Südost nach Nordwest geneigt. Der Nordwestliche Teil des EZGs neigt sich von Nordost nach Südwest. Die das EZG prägende Bodenart ist mittel schluffiger Ton (Tu3) (Abb. 4.7). Geologisch dominiert hier die Opalinuston-Formation, ein toniges Gestein, des Mitteljuras.

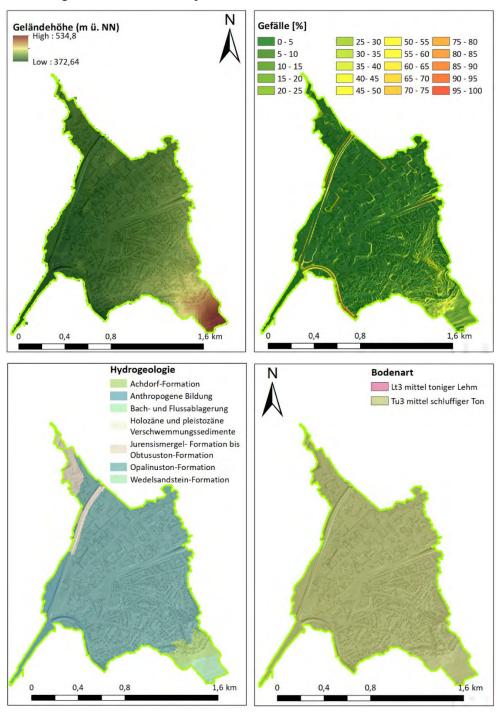


Abbildung 4.7 Karten zu Geländehöhe, Gefälle, Hydrogeologie und Bodenart im EZG NO (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten; Hydrogeologie: LGRB)

4.1.3 EZG Gönningen

Das EZG Gönningen ist das größte EZG. Es umschließt die gesamte Siedlungsfläche der Gemeinde Gönningen und erstreckt sich über eine Fläche von 11,6 km². Mit 14,3 % versiegelter Fläche ist es das am wenigsten versiegelte EZG. Es dominieren Grünland, Mischwälder und Laubwälder (36,6 %, 20,3 % und 18,8 %). Von den versiegelten Flächen sind 42,4 % zu über 90 % versiegelt. 33,1 % sind zu > 20 – 30 % und 8,3 % sind zu > 0 – 10 % versiegelt. Im Osten des EZGs, unterhalb der Gemeinde Genkingen, entspringt die Wiesaz in einer Karstquelle des Albtraufs. Die Wiesaz fließt durch ein eingekerbtes Tal zwischen Oberjura-Steilhängen von Ost nach West auf Gönningen zu und durch die Gemeinde durch. An der Mündung der Wiesaz in die Steinlach (Anhang 1) wurde der mittlere Abfluss (MQ) auf 0,5 m³/s berechnet (Schmid et al., 2009). Ein Pegel zur kontinuierlichen Abflussmessung ist im EZG der Wiesaz nicht vorhanden.

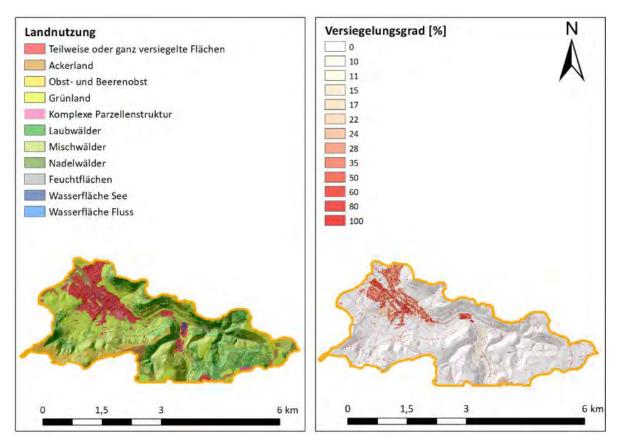


Abbildung 4.8 Karten zur Landnutzung und zum Versiegelungsgrad im EZG GOE (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten)

Versiegerung	versiegerungsgrade an der versiegenen Flache des EZOS GOE									
Landnutzung	Anteil an der EZG-Fläche [%]	Versiegelungsgrad	Anteil an der versiegelten EZG-Fläche [%]							
Teilweise oder ganz	14.2	> 0-10	8,3							
versiegelte Flächen	14,3	> 10 – 20	7,1							
Grünland	36,6	> 20 – 30	33,1							
Mischwälder	20,3	> 30 – 40	3,7							
Laubwälder	18,8	> 40 – 50	2,1							
Obst- und Beerenobst	4,1	> 50 - 60	0,1							
Ackerland	3,1	> 60 - 70	0							
Komplexe Parzellenstruktur	1,2	> 70 - 80	3,3							
Nadelwälder	0,7	> 80 – 90	0							
Wasserfläche Fluss	0,5	> 90	42,4							
Wasserfläche See	0,2									
Feuchtflächen	< 0,1									

Tabelle 4.3 Prozentuale Anteile der Landnutzungsklassen an der gesamten EZG-Fläche und der Versiegelungsgrade an der versiegelten Fläche des EZGs GOE

Die mittlere Geländehöhe liegt bei 674 m (Abb. 4.9). Die Differenz zwischen dem höchsten Punkt auf dem Plateau der Schwäbischen Alb im Süden des EZGs von 869 m ü. NN und dem niedrigsten Punkt im Nordwesten des EZG von 496 m ü. NN beträgt von 373 m. Damit ist der Höhenunterschied im EZG deutlich höher als in den EZG ACH und NO. Dies spiegelt sich im durchschnittlichen Gefälle mit 26,6 % wider. Auf versiegelten Flächen liegt das Gefälle bei 14,2 %. Die größten Hangneigungen finden sich entlang der Abbruchkante der Oberjurakalke am Albtrauf im Südosten des EZGs. Geologisch unterscheidet sich das EZG GOE ein wenig von den anderen EZG. Durch dessen Lage direkt am Albtrauf stammen große Teile der Gesteine aus dem Oberjura. In Richtung Westen streichen die Schichten aus und gehen in die Gesteine des Mitteljuras über. Die dominierende Bodenart ist auch in diesem EZG mittel schluffiger Ton (Tu3) (Abb. 4.10).

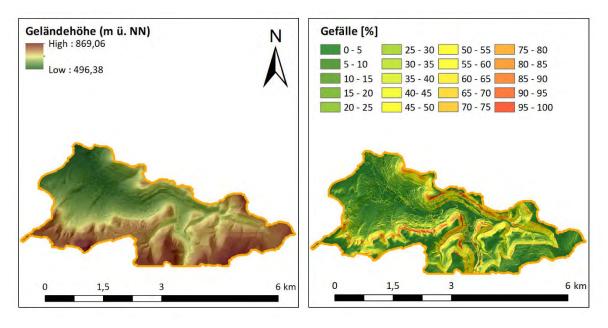


Abbildung 4.9 Karten zu Geländehöhe und Gefälle im EZG GOE (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten)

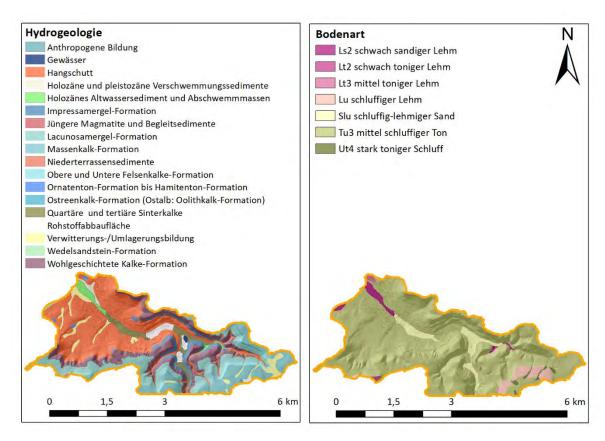


Abbildung 4.10 Karten zu Hydrogeologie und Bodenart im EZG GOE (Datenquelle: RoGeR Eingangsdaten; Hydrogeologie: LGRB)

4.2 Beschreibung der Niederschlagsereignisse

Seit der Installation des in Kapitel 4.1 erwähnten Bodenniederschlagsmessnetzes in Reutlingen wurden zu vier verschiedenen Zeitpunkten Starkniederschlagsereignisse aufgezeichnet, die in Folge von hohen Oberflächenabflüssen Schäden verursachten:

09. – 10. August 2015	24. – 25. Juni 2016	7. Juni 2018	10. – 11. Juni 2018
-----------------------	---------------------	--------------	---------------------

In dieser Arbeit werden nur zwei der Ereigniszeiträume (gelb markiert) näher betrachtet. In Anhang 2 sind Grafiken der aufgezeichneten Niederschlagsmengen zu den hier nicht weiter betrachteten Ereigniszeiträumen zu finden. Mit der Kennzeichnung von Feuerwehreinsätzen in Abbildung 4.11, wird die Schwere der ausgewählten Niederschlagsereignisse verdeutlicht. Die folgende Beschreibung der Niederschlagsereignisse bezüglich ihres Verlaufs und der großräumigen meteorologischen Bedingungen basiert im Wesentlichen auf Informationen der Kachelmann GmbH (2019).

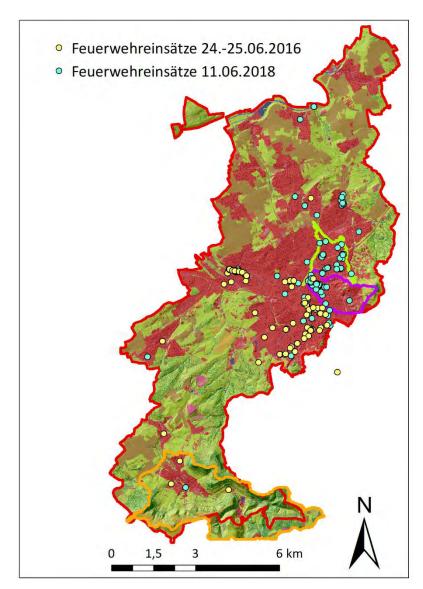


Abbildung 4.11 Feuerwehreinsätze im Stadtgebiet Reutlingen während der Ereignisse 2016 und 2018

4.2.1 Ereignis am 24. – 25. Juni 2016

Laut dem DWD herrschte vom 24. bis 26. Juni 2016 die entsprechend Hess & Brezowsky definierte Großwetterlage (GWL) "Trog Westeuropa (TrW)" vor, die Niederschläge über ganz Deutschland brachte (DWD, 2016b). In den dem Ereignis vorangegangenen 30 Tagen fielen in BW verbreitet große Mengen an Niederschlag. Es fielen flächendeckend über 100 mm. Einige Regionen verzeichneten mit über 200 mm bis 400 mm deutlich mehr. Zum Ereignis des 24.-25. Juni 2016 kamen die Luftmassen bei schwachgradientiger Strömung aus dem Südwesten. Dies führte dazu, dass sich Niederschlagszellen sehr langsam bewegten. Laut nicht kalibrierter Radarsummen wurde Reutlingen im Vergleich zu anderen Regionen in Baden-Württemberg von verhältnismäßig niedrigen Niederschlagssummen getroffen. In Horb am Neckar fielen bspw. innerhalb einer Stunde ca. 100 mm. Demnach war das

Ereignis in Reutlingen Teil eines Zusammenschlusses mehrerer Gewitterzellen zu einem mesoskaligen konvektiven System, das bis Stuttgart reichte.

Anhand von Abbildung 4.13 kann die räumliche und zeitliche Variabilität des Ereignisses nachvollzogen werden. Dargestellt sind Ausschnitte von Kachelmann-Radardaten im Abstand von 5 min von 21:30 bis 23:05 Uhr (Kachelmann GmbH, 2019). Um 21:35 Uhr bildete sich über dem östlichen Zipfel des EZGs GOE ein Niederschlagsschwerpunkt. Bei Betrachtung der Radarbilder von 21:35 bis 22:20 Uhr fällt auf, dass sich der Schwerpunkt nur minimal in nordöstliche Richtung verlagerte. Zwischen 22:05 und 22:15 Uhr können deutlich zwei Gewitterkerne erkannt werden. Der nordwestliche Kern zog nordwestlich der Stationen 8, 6, 2 und 1 in nordöstlicher Richtung vorbei. Der südöstliche Kern streifte um 22:10 und 22:15 Uhr S11 und zog anschließend langsam in nordöstliche Richtung weiter und schwächte sich ab.

Die räumliche Ausdehnung der höchsten Niederschlagsintensitäten war von Nordwest nach Südost größer als von Südwest nach Nordost. Damit wurde ein großer Abschnitt des Echazverlaufs mit hohen Niederschlagsintensitäten beregnet. Die Quelle der Echaz liegt südöstlich von Station 11. Im Zeitraum von ca. 21:40 Uhr bis ca. 22:25 Uhr fielen über diesem Gebiet 5-minütige Niederschlagssummen, die entsprechend der Radarbild-Legende von "sehr stark(er)" Intensität waren.

Abbildung 4.12 zeigt das gesamte Ereignis anhand der vom Bodenniederschlagsmessnetz erfassten 1-minütigen Niederschlagsmengen. Entsprechend der Definition zur Abgrenzung Niederschlagsereignissen in Regelwerk DWA-A 531 (vergl. Kapitel 4.4.2.2) sind auch die geringeren Niederschlagsintensitäten ab ca. 23 Uhr mit eingeschlossen (DWA, 2012). Im Verlauf des Ereignisses gab es nur einen "peak", der sich je nach Lage der Nd.-Station zu unterschiedlichen Zeitpunkten ereignete. Der intensive Teil des Niederschlagsereignisses fand zwischen 21:45 Uhr und 23 Uhr statt. Die höchsten im Bodenniederschlagsmessnetz gemessenen 1-minütigen Niederschlagsmengen verzeichnete Station 11 (S11) mit 4,3 mm um 22:27 Uhr, gefolgt von S12 mit 3,9 mm um 22:01 Uhr und S9 mit 3,5 mm um 22:13 Uhr. Die höchsten 5-minütigen Niederschlagsmengen verzeichnete S11 mit 17,5 mm zwischen 22:24 und 22:29 Uhr, gefolgt von S12 mit 16,2 mm von 21:57 bis 22:02 Uhr und S9 mit 15,4 mm zwischen 22:11 und 22:16 Uhr.

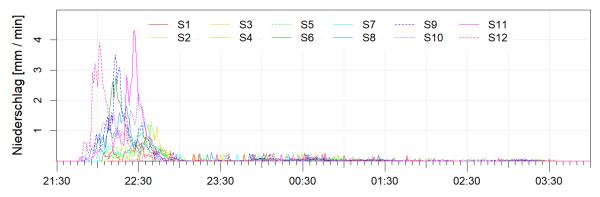


Abbildung 4.12 An Stationen S1-S12 verzeichnete Niederschlagsmengen während des Ereignisses am 24. - 25. Juni 2016

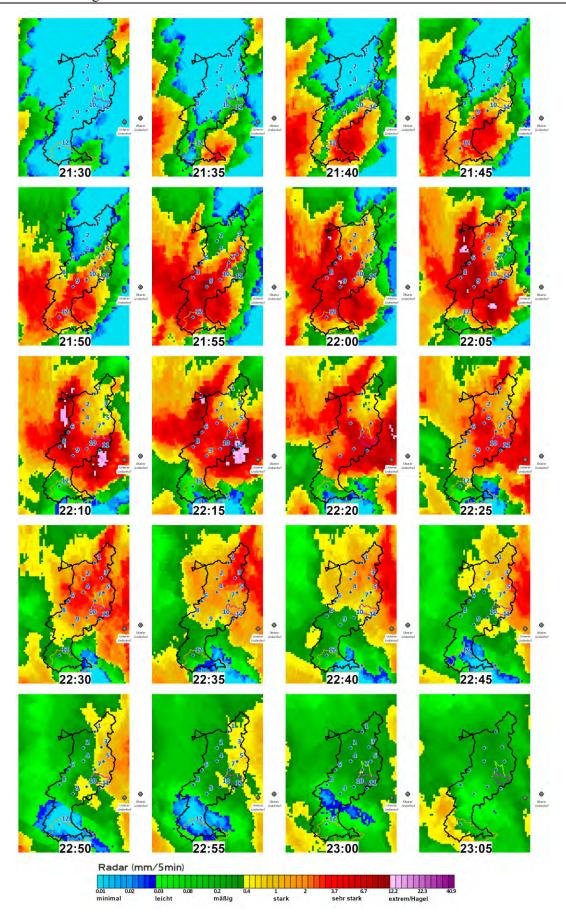


Abbildung 4.13 Kachelmann-Radarbilder der kalibrierten 5-minütigen Niederschlagssummen am 24. Juni 2016 (Kachelmann GmbH, 2019)

4.2.2 Ereignis am 11. Juni 2018

Am 11. Juni 2018 traten nordöstlich von Reutlingen verbreitet Gewitter auf. Diese waren teilweise in größer-flächigere, nicht-gewittrige Regenfälle eingelagert. Die Zuggeschwindigkeit war deutlich höher als beim Ereignis im Juni 2016, jedoch mit gleicher Zugrichtung - aus dem Südwesten kommend. Das Ereignis ging 2018 anders als 2016 von einer einzelnen lokalen Gewitterzelle aus. Innerhalb von 30 Tagen vor dem Ereignis 2018 wurden geringere flächendeckende Niederschlagssummen in BW registriert als im 30-tägigen Zeitraum vor dem Ereignis 2016. Mit Fokus auf die Region Reutlingen lagen die Niederschlagsmengen jedoch nur minimal voneinander entfernt. Vom 05. bis 12. Juni 2018 herrschte über Deutschland die Großwetterlage "Hoch Nordmeer-Island, Mitteleuropa überwiegend zyklonal (HNz)" nach Hess & Brezowsky. In diesem Zeitraum fielen in Süddeutschland im Schnitt 159 mm, was 53 % des im Schnitt in Süddeutschland im Juni 2018 gefallenen Niederschlags ausmachte (DWD, 2018b). Das in dieser Arbeit nicht näher betrachtete Ereignis am 7. Juni 2018 ereignete sich während der gleichen GWL.

Abbildung 4.15 liefert anhand der 5-minütigen Kachelmann-Radarbilder einen Überblick über das Niederschlagsgeschehen. Um 18:30 Uhr zog eine von Nord nach Süd ausgerichtete Niederschlagsfront aus dem Westen auf Reutlingen zu. Von 18:35 bis 18:50 Uhr entwickelten sich drei Schwerpunkte, die sich ab 18:50 Uhr vereinten. Von 18:55 bis 19:10 Uhr hatte das Niederschlagsereignis über Reutlingen einen nahezu stationären Charakter, bis es dann langsam in nordöstliche Richtung abzog.

Abbildung 4.14 zeigt die von den Stationen 1 bis 12 erfassten Niederschlagsmengen. Bei genauerer Betrachtung einzelner Nd.-Stationen fällt auf, dass es im Verlauf des Ereignisses zwei "peaks" gab. Das gesamte Starkregenereignis erstreckte sich über einen Zeitraum von ca. 1,5 h zwischen 18:30 und 20 Uhr. Das Bodenniederschlagsmessnetz verzeichnete die höchsten 1-minütigen Niederschlagsmengen an Station 11 (S11) mit 2,4 mm um 19:10 Uhr, gefolgt von S8 mit 2,1 mm um 18:58 Uhr und S10 mit 1,9 mm um 19:26 Uhr. Die höchste in einem Zeitraum von fünf Minuten gefallene Niederschlagsmenge wurde mit 11 mm an S11 zwischen 19:07 und 19:12 Uhr gemessen. S10 folgt mit 8,4 mm zwischen 19:21 und 19:26 Uhr und S7 mit 7,7 mm zwischen 19:10 und 19:15 Uhr. Weitere Angaben zu den Maximalwerten der Dauerstufen der einzelnen Stationen sind in Anhang 3 aufgeführt.

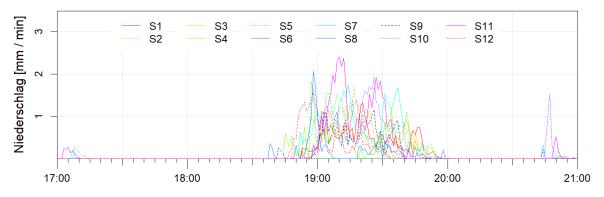


Abbildung 4.14 An Stationen S1-S12 verzeichnete Niederschlagsmengen während des Ereignisses am 11. Juni 2018

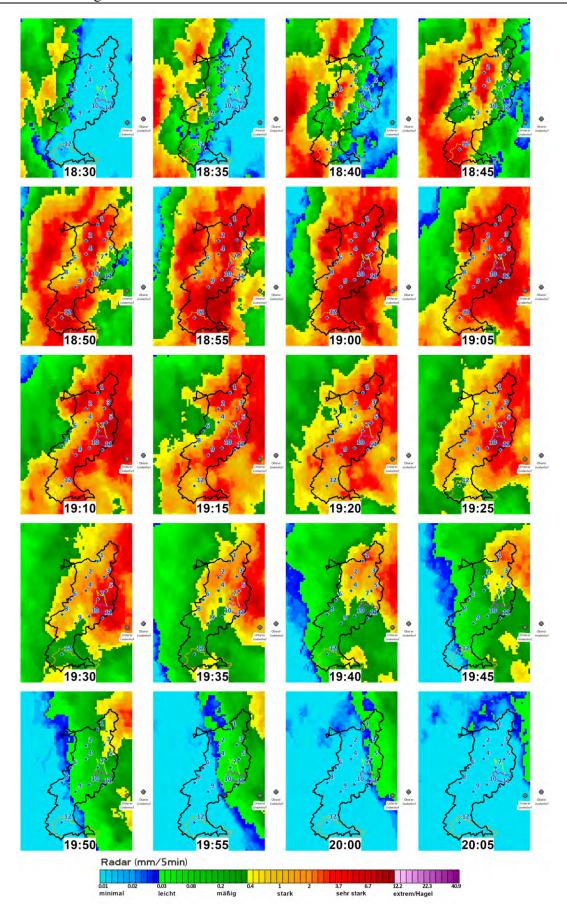


Abbildung 4.15 Kachelmann-Radarbilder der kalibrierten 5-minütigen Niederschlagssummen am 11. Juni 2018 (Kachelmann GmbH, 2019)

4.3 Wahl der Untersuchungsgebiete und Niederschlagsereignisse

Die Auswahl der EZG und der Niederschlagsereignisse wurde durch verschiedene Kriterien beeinflusst, die in diesem Kapitel kurz zusammengefasst werden sollen. Die prominentesten Kriterien dabei waren das Vorhandensein von Niederschlagsdaten, Feuerwehreinsätzen und die Verschiedenartigkeit der EZG in Größe, Landnutzung und Gefälle. Durch den zeitlichen Rahmen konnten nur drei EZG ausgewählt und bearbeitet werden.

Die Zahl der zur Auswahl stehenden Niederschlagsereignisse wurde davon begrenzt, dass das Bodenniederschlagsmessnetz erst 2014 bzw. 2015 installiert wurde. In diesem Zeitraum ereigneten sich nur vier herausstechende Niederschlagsereignisse. Deren Benennung erfolgte durch Torsten Müller, dem Leiter des Fachgebiets Gewässer und Hochwasserschutz der Stadtentwässerung Reutlingen anhand von Erfahrungswerten.

Wie in Kapitel 2.3.2 erwähnt, müssen Modellierungsergebnisse validiert werden. Dies erfolgt im Idealfall über Bild- und Videomaterial. Dokumentierte Feuerwehreinsätze kennzeichnen Orte an denen Probleme und/oder Schäden durch Wasser verursacht wurden. Im besten Fall wurden vor Ort Fotos und Videos gemacht. Für die Ereignisse am 7. und 11. Juni 2018 waren die Einsatzorte in digitaler Form verfügbar. Zum Ereignis am 24. – 25. Juni 2016 lagen die Einsatzorte nur in Papierform vor und mussten erst digitalisiert werden. Zum Ereignis am 09. – 10. August 2015 waren keine Informationen vorhanden. Am 24. – 25. Juni 2016 wurde die Feuerwehr zu 103 Einsätzen gerufen. Die meisten Einsätze betrafen Gebiete entlang der Echaz. Ca. 20 Einsätze waren im südlichen Teil der Reutlinger Kernstadt. Am 7. Juni 2018 hatte die Feuerwehr 20 Einsätze, wovon die Hälfte im Stadtteil Sondelfingen lagen. Am 11. Juni 2018 waren es 88 Einsätze, wovon sich ca. die Hälfte auf die Kernstadt Reutlingen konzentrierte (vergl. Abb. 4.11). Die meisten Einsätze hatte die Feuerwehr am 10. 08. 2002 mit 389 an der Zahl und am 28 Juli 2013 mit 185. Wie im vorigen Absatz erwähnt konnten diese Ereignisse leider nicht vom Bodenmessnetz aufgezeichnet werden und standen dementsprechend in dieser Arbeit nicht zur Auswertung zur Verfügung.

4.4 Starkregenindex (SRI)

Die Starkregenkategorisierung mittels SRI nach Schmitt et al. (2018) erfolgt auf Basis einer Starkregenindexmatrix (SRI-Matrix). Dieser SRI-Matrix liegt eine Starkregenextremwertstatistik zugrunde. Genaue Vorgaben, welche Starkregenextremwertstatistik hierfür verwendet werden soll, sind nicht gegeben. Mit der SRI-Matrix werden Niederschlagswertebereiche definiert, die den Rahmen für die SRI-Zuordnung von einzelnen Niederschlagsereignissen stellen. In diesem Kapitel wird zuerst die Erstellung der SRI-Matrix und deren Datengrundlage genauer erläutert und anschließend in Kapitel 4.4.2 die Zuordnung der SRI zu den in Kapitel 4.2 beschriebenen Niederschlagsereignissen.

4.4.1 Erstellung der SRI-Matrizen

Zur Erstellung der SRI-Matrix wurde die "Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung (KOSTRA)" des DWD (KOSTRA-DWD-2010R) als zugrunde liegende Starkregenstatistik gewählt. In den folgenden Kapiteln 4.4.1.1 und 4.4.1.2 wird erst die Datengrundlage näher erläutert, um danach die Erstellung der SRI-Matrix zu beschreiben.

4.4.1.1 Datengrundlage

Seit mehr als 30 Jahren arbeitet der Deutsche Wetterdienst (DWD) kontinuierlich an statistischen Untersuchungen zum Starkniederschlagsgeschehen in Deutschland, die er in Form des KOSTRAs veröffentlicht. Innerhalb des Zeitraums wurden verschiedene, dem jeweiligen Stand des Wissens entsprechend überarbeitete Versionen herausgebracht. Die hier verwendete Version KOSTRA-DWD-2010R ist die Revision der zweiten Fortschreibung und basiert auf den Jahren 1951 bis 2010. Enthalten sind Tabellenwerte für einzelne Stationen sowie Rasterdatensätze zu regionalisierten Ergebnissen. Diese basieren auf Auswertungen von punktuell ermittelten Starkniederschlagshöhen für unterschiedliche Dauerstufen und Jährlichkeiten (Wiederkehrzeiten) und deren Übertragung auf die Fläche durch Interpolation. Hier sind besonders die flächendeckenden, regionalisierten Ergebnisse von Interesse, die in Form von Rastern mit einer räumlichen Auflösung von 8,15 km x 8,20 km zur Verfügung stehen. Da bei der Arbeit mit Daten aus verschiedenen Gründen häufig Unsicherheiten auftreten, sind für die KOSTRA-DWD dauerstufendifferenzierte Angaben Toleranzbereiche angegeben. Toleranzbereiche ergeben sich vor allem durch die große Variabilität von Starkniederschlägen in Raum und Zeit und die natürliche Klimavariabilität (Junghänel et al., 2017):

```
- 1a \leq T \leq 5 a: Toleranzbetrag von \pm 10\%
```

- 5a < T \le 50a: Toleranzbetrag von \pm 15%

- 50a < T \le 100a: Toleranzbetrag von \pm 20%

Die KOSTRA-DWD-2010R-Datensätze stehen als Tabellen und Geodaten in Form von Raster-Datensätzen online zum freien Download zur Verfügung (DWD, 2019a). Jeder Raster-Datensatz enthält die Regenhöhen der Wiederkehrzeiten T_n = 1 a, 2 a, 3 a, 5 a, 10 a, 20 a, 30 a, 50 a und 100 a für jeweils eine der 18 enthaltenen Dauerstufen D = 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 45 min, 60 min, 90 min, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h, 9 h, 12 h, 18 h, 24 h, 48 h und 72 h. In Abbildung 4.16 ist mittels des Programms ArcGIS beispielhaft einer der flächendeckenden KOSTRA-Rasterdatensätze für die Dauerstufe 5 min für ganz Deutschland dargestellt. Die Bezeichnung der einzelnen Rasterzellen setzt sich aus (Zeile x 1000) + Spalte zusammen (vergl. Abb. 4.17). Das Stadtgebiet Reutlingen erstreckt sich über fünf KOSTRA-Rasterzellen: 87028, 88027, 88028, 89027 und 89028 (Abb. 4.17).

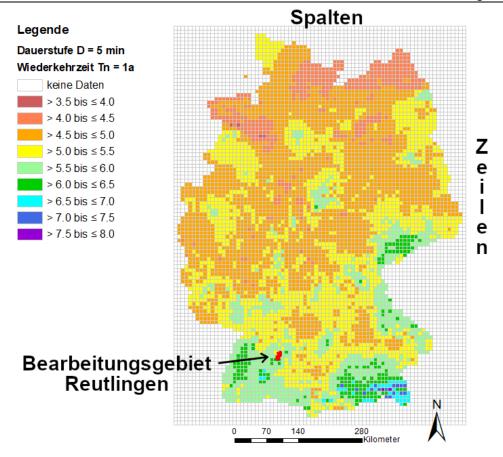


Abbildung 4.16 Beispielhafte Darstellung eines KOSTRA-Rasters der Dauerstufe D=5 min und der Wiederkehrzeit $T_n=1$ a mit der geografischen Lage des Stadtgebiets Reutlingen

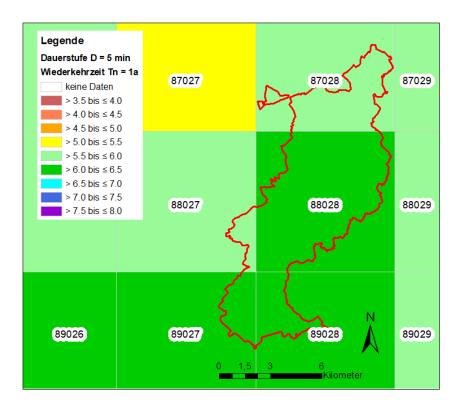


Abbildung 4.17 Ausschnitt der im Stadtgebiet Reutlingen liegenden KOSTRA-Raster

4.4.1.2 Methode

Die Erstellung der SRI-Matrizen für Reutlingen auf Basis von KOSTRA-DWD-2010R erfolgte nach der Vorgabe von Schmitt et al. (2018). Da die KOSTRA-Rasterzellen unterschiedliche Werte enthalten wurde für jede Rasterzelle eine eigene SRI-Matrix erstellt. Die hierfür benötigten Daten wurden für die für Reutlingen identifizierten relevanten KOSTRA-Rasterzellen aus den KOSTRA-DWD-2010R-Tabellen extrahiert.

Mit den SRI-Matrizen werden Niederschlagshöhen in Abhängigkeit der Dauerstufe (D = 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 45 min, 60 min, 90 min, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h, 9 h, 12 h, 18 h, 1 d, 2 d, 3 d, 4 d, 5 d und 6 d) und des Wiederkehrintervalls (T_n = 1 a, 2 a, 3 a, 5 a, 10 a, 20 a, 25 a, 30 a, 50 a, 100 a und > 100 a) einem SRI von 1 bis 12 zugeteilt. Da in KOSTRA-DWD-2010R nur Dauerstufen bis D = 3d definiert sind, werden die SRI-Matrizen nur bis zu dieser Dauerstufe erstellt. Den SRI von 1 bis 7 werden aus örtlichen Starkregenstatistiken ermittelte Wiederkehrzeiten T_n zwischen 1 und 100 Jahren zugeordnet. Dementsprechend wurden die Regenhöhen der Wiederkehrzeiten von T_n = 1 a bis T_n = 100 a, ausgenommen T_n = 25 a, direkt den KOSTRA-Tabellen entnommen und den SRI von 1 bis 7 zugeordnet. Die in den KOSTRA-Tabellen nicht enthaltenen Regenhöhen für die Wiederkehrzeit T_n = 25 a wurden ergänzt. Dies erfolgte entsprechend des Regelwerks DWA-A 531 mittels Gleichung 4. Hierbei wird innerhalb einer Dauerstufe über die Niederschlagshöhen für T_n = 1 a und T_n = 100 a die Regenhöhe des entsprechenden Wiederkehrintervalls ermittelt.

$$h_N(T_n) = u_p + w_p \times \ln T_n$$
 mit h_N Regenhöhe in mm T_n Wiederkehrintervall in a $w = \frac{h_{N(T=100)} - u}{\ln 100}$ $u = h_{N(T=1)}$

Den SRI zwischen 8 und 12 entsprechen Wiederkehrzeiten von mehr als 100 Jahren. Um innerhalb der Wiederkehrzeitangabe von > 100 Jahren eine Abstufung der den SRI von 8 bis 12 zugeordneten Niederschlagshöhen zu erhalten, wird die Niederschlagshöhe der Wiederkehrzeit $T_n = 100$ a als Ankerwert definiert und mit entsprechenden Erhöhungsfaktoren multipliziert. Dabei wird für jeden SRI von 8 bis 12 ein Wertebereich aufgespannt (Tab. 4.4).

Tabelle 4.4 Zusammenfassung der mit der als Ankerwert definierten Regenhöhe der Wiederkehrzeit $T_n = 100$ a multiplizierten Erhöhungsfaktoren zur Ermittlung der Regenhöhen der SRI > 8

Wiederkehrzeit T _n [a]	100	> 100								
Starkregenindex SRI [-]	7	8	10	11	12					
Erhöhungsfaktor [-]	1,00	1,20 – 1,39	1,40 – 1,59	1,60 – 2,19	2,20 – 2,79	≥ 2,80				

Für den Aufbau der Matrizen werden die Dauerstufen in vertikaler Richtung und die Jährlichkeiten mit den zugehörigen SRI in horizontaler Richtung aufgetragen. Unterhalb der SRI von 8 bis 12 stehen die zu deren Berechnung angewandten Erhöhungsfaktoren. In die Matrizen werden die Niederschlagshöhen der entsprechenden Kombination aus Dauerstufe und Jährlichkeit bzw. SRI eingetragen. Den SRI von 1-2, 3-5, 6-7 und 8-12 sind jeweils die Begrifflichkeiten "Starkregen", "intensiver Starkregen", "außergewöhnlicher Starkregen" und "extremer Starkregen" zugeordnet. Zur besseren Visualisierung der SRI wurde jedem Index eine Farbe aus dem RGB-Farbraum zugeordnet. Zur Verbildlichung ist in Abbildung 4.18 der Kopf der nach Schmitt et al. (2018) zu erstellenden Matrix dargestellt.

Wiederkehrzeit Tn [a]	1	2	3,3	5	10	20	25	33,3	50	100	> 100				
Kategorie	Starkregen			Int	ensiver	Starkreg	jen	außergewöhnli	cher Starkregen	extremer Starkregen					
Starkregenindex SRI [-]	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Erhöhungsfaktor [-]	1,00 1,20 - 1,39 1,40 - 1,59 1,60 - 2,19 2,20 - 2,7					2,20 - 2,79	≥ 2,80								

Abbildung 4.18 Farbliche Kennzeichnung der SRI und zugehörige Starkregenkategorien (Schmitt et al., 2018)

4.4.2 Ereignisbezogener SRI

Auf Basis der SRI-Matrizen werden nun den in Kapitel 4.2 beschriebenen Niederschlagsereignissen ein SRI zugeordnet. In diesem Kapitel werden erst die Herkunft und Aufbereitung der hierfür genutzten Niederschlagsaufzeichnungen behandelt und anschließend die Methode zur SRI-Zuordnung beschrieben.

4.4.2.1 Datengrundlage und -aufbereitung

Die zur Auswertung der Niederschlagsereignisse verwendeten Niederschlagsdaten stammen aus den Aufzeichnungen des Reutlinger Bodenniederschlagsmessnetzes. Installiert sind 12 OTT Pluvio² Bodenniederschlagsmessstationen der OTT HydroMet GmbH. Die 12 zylindrischen Auffanggefäße haben eine Öffnung von 200 cm². Die Niederschlagsmessung erfolgt nach dem Wägeprinzip. Die Aufzeichnungskapazität beträgt 1500 mm Niederschlag. Alle Messstationen sind mit dem Datensammler OTT netDL1000 ausgestattet. Über die Software Hydras 3 können die Messdaten abgerufen werden.

Die Niederschlagsmenge wird mit einer absoluten und relativen Genauigkeit von \pm 0,1 mm und \pm 1 % in 1-minütigen Intervallen erfasst. Durch die hohe zeitliche Auflösung werden sehr große Datenmengen generiert. Um diese auf ein Minimum zu reduzieren, unterbricht die Messstation die Aufzeichnung, sobald die gemessene Regenmenge 0 mm beträgt. Daraus resultieren lückenhafte Zeitreihen, welche für jede der 12 Stationen aufbereitet werden mussten (OTT HydroMet GmbH, 2019b; OTT HydroMet GmbH, 2019a). Ausgegeben werden die Daten in MEZ (Mitteleuropäische Zeit, (UTC+1). Da die in dieser Arbeit ausgewerteten Ereignisse alle im Sommer stattfanden, wurden die Niederschlagsdaten in MESZ (Mitteleuropäische Sommerzeit, UTC+2) transformiert.

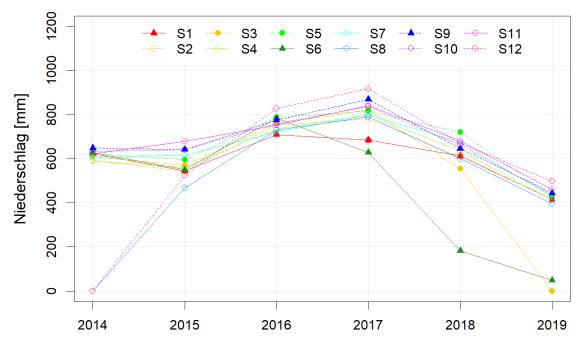


Abbildung 4.19 Jahresniederschlagssummen der 12 Niederschlagsmessstationen (S1 – S12) in Reutlingen seit der Installation der ersten zehn Messstationen im Jahr 2014

Über Jahresniederschlagssummen der einzelnen Stationen erfolgte eine visuelle Plausibilitätsprüfung der Messdaten (Abb. 4.19). Die Jahresniederschlagssummen von Null an Stationen 8 und 12 im Jahr 2014 erklären sich durch deren spätere Installation im Jahre 2015 und die von Station 3 im Jahr 2019 durch ihren Installationsort, der auf dem Gelände einer Kläranlage liegt, die sich seit Ende 2018 im Umbau befindet. Die abweichenden Werte in den Jahren 2017 bis 2019 von Station 6 sind wie bei Station 3 ebenfalls durch den Installationsort begründet. Station 6 liegt ebenfalls auf dem Gelände einer Kläranlage, die sich im Umbau befindet. Für Station 1 weicht die Summe nur im Jahr 2017 von den anderen Stationen ab. Da sich auch diese auf dem Gelände einer Kläranlage befindet, könnte der Grund eine Messunterbrechung durch Umbaumaßnahmen sein. Abgesehen von den genannten Abweichungen verzeichnet keine der anderen Stationen unerklärliche Schwankungen. Daher konnten alle Stationen für die Analysen verwendet werden.

4.4.2.2 Methode

Um den Niederschlagsereignissen einen SRI zuzuordnen, mussten aus den 1-minütigen Niederschlagsmesswerten Dauerstufen gebildet werden. Dies erfolgte entsprechend des Regelwerks DWA-A 531 (DWA, 2012). Je nach Messintervalllänge und Dauerstufe D werden n zusammenhängende Intervalle aufsummiert. Abbildung 4.20 beschreibt grafisch das Vorgehen anhand von 1 h Intervallen und der Dauerstufe D = 3 h. Begonnen wird mit den ersten n Intervallen eines Zeitfensters D (Abb. 4.20, a)). Diese werden aufsummiert und in eine neue Zeitreihe geschrieben (Abb. 4.20, b)). Das Zeitfenster wird daraufhin in der Zeit um ein Intervall nach hinten verschoben, die Werte wiederum aufsummiert und in die neue Zeitreihe unterhalb des letzten Intervalls geschrieben. Die

resultierende Dauerstufen-Zeitreihe ist im Endeffekt von derselben Länge wie die ursprüngliche Niederschlagszeitreihe, abzüglich der letzten (n-1) Intervalle.

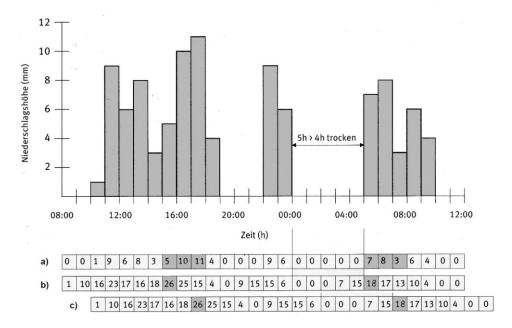


Abbildung 4.20 Beschreibung des Vorgehens zur Bildung von Dauerstufen (DWA, 2012)

Anders als im Regelwerk DWA-A 531 beschrieben werden die Niederschlagsmengen nicht vorgreifend aufsummiert (Abb. 4.20, b)), sondern rückgreifend (Abb. 4.20, c)). Die Angabe der aufsummierten gefallenen Niederschlagsmenge zu einem bestimmten Zeitpunkt wurde als sinniger befunden, da dies den physikalischen Gesetzen entspricht. Dementsprechend sind die Dauerstufen-Zeitreihen nicht abzüglich der letzten (n-1) Intervalle sondern der ersten (DWA, 2012).

Die Dauerstufen wurden für die Zeitintervalle von 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360, 540, 720, 1080, 1440, 2880 und 4320 min gebildet. Da diese die in KOSTRA enthaltenen Dauerstufen darstellen, ist eine SRI-Zuordnung nur innerhalb derer möglich. Die maximal berechenbare Dauerstufe hängt zum einen von der Dauer des Niederschlagsereignisses ab und zum anderen von der Länge des Zeitraums, in dem vor dem Ereignis kein Niederschlag fiel. Ist dieser Zeitraum kürzer als die zu berechnende Dauerstufe, ist die Ereignisunabhängigkeit nicht mehr gegeben. Laut Regelwerk DWA-A 531 sind Ereignisse nur dann voneinander unabhängig, wenn diese in einem Abstand von 4 h auftreten. Da es sich hier jedoch um keine statistische Zeitreihenanalyse handelt, sondern um eine Einzelbetrachtung eines Ereignisses, wurde für die Bildung der jeweiligen Dauerstufe nur auf die der Dauerstufenlänge entsprechende Niederschlagspause geachtet (DWA, 2012).

Da die Ereignisse auf die maximal erreichten SRI hin untersucht werden sollten, wurden anschließend die Maxima aus den Dauerstufen-Zeitreihen extrahiert (vergl. Abb.4.20 b) & c), grau hinterlegt). Um nun den maximalen Niederschlagswerten der Dauerstufen eines jeden Ereignisses einem SRI zuzuordnen, musste die für die Niederschlagsstation entsprechende SRI-Matrix ermittelt werden. Dies erfolgte anhand von ArcGIS und ist in Abbildung 4.21 grafisch dargestellt. Die Stationen 1, 2 und 3

wurden dem KOSTRA-Raster 87028, die Stationen 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 und 11 dem KOSTRA-Raster 88028 und Station 12 dem KOSTRA-Rasters 89028 zugeordnet.

Fiel ein zuzuordnender Niederschlagswert in einen Bereich zwischen zwei SRI, wurde gemäß Krüger und Pfister (2016) der höhere SRI vergeben. Somit bilden die über die Wiederkehrzeiten von $T_n = 1$ a bis T = 100 a ermittelten Niederschlagshöhen der SRI von 1 bis 7 die Obergrenzen der SRI-Definitionsbereiche (Abb. 4.18).

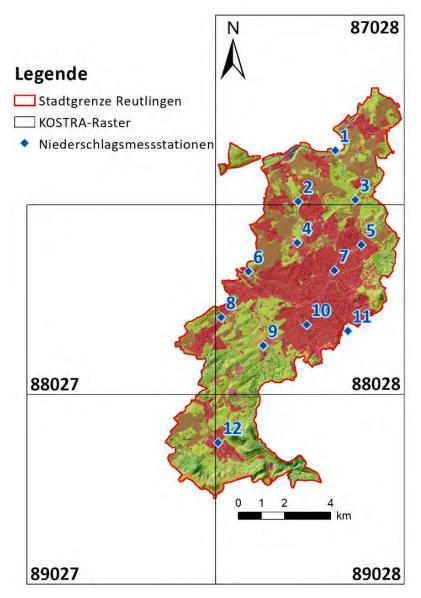


Abbildung 4.21 Grafische Zuteilung der Niederschlagsstationen zu einem KOSTRA-Raster

4.5 Hydrologische und hydraulische Modellierung mit RoGeR

Im ersten Kapitel wird die Herkunft und die Funktionsweise des Modells RoGeR dynamo beschrieben. Darauf folgen Ausführungen zur Herkunft und Aufbereitung der in dieser Arbeit zur Modellierung verwendeten Daten. Im daran anschließenden Kapitel wird auf die Szenarienmodellierung eingegangen, um im letzten Kapitel die Vorgehensweise zur Auswertung der Modellierungsergebnisse zu erläutern.

4.5.1 Das Modell RoGeR

Das ereignisbasierte Niederschlag-Abfluss-Modell RoGeR ist in der Lage Abflussbildungsprozesse wie auch die Prozesse der Abflusskonzentration für die verschiedenen Abflusskomponenten (Oberflächenabfluss, schneller Zwischenabfluss, langsamer Zwischenabfluss und Tiefenperkolation) auf der Plotskale bis zum mesoskaligen EZG abzubilden. In der Basisversion wird der gefallene Niederschlag anhand von physiografischen Gegebenheiten in die verschiedenen Abflusskomponenten aufgeteilt und pro Rasterzelle quantifiziert. Mittels eines statischen geomorphologischen Einheitsganglinienverfahrens (GeoUH) wird die Abflusskonzentration modelliert. Dabei ist eine Wiederinfiltration von abfließendem Wasser ausgeschlossen.

Um das Oberflächenabflussgeschehen pro Zeitschritt räumlich abzubilden wurde RoGeR durch einen 2D-hydraulischen Ansatz erweitert und als RoGeR dynamo bezeichnet. Pro Zeitschritt und Rasterzelle wird die Abflussbildung berechnet. Zeitgleich wird der gebildete Oberflächenabfluss entlang des Reliefs geroutet. Dabei wird der gefallene Niederschlag wie auch laterale Zuflüsse berücksichtigt, die im Gegensatz zur Basisversion von RoGeR auch wieder infiltrieren können. Die Fließgeschwindigkeiten werden in Abhängigkeit der Überflutungstiefen angepasst. Als Endprodukt erhält man ein zeitlich und räumlich differenziertes Bild des Abflussgeschehens (Steinbrich et al., 2015; Steinbrich et al., 2016a).

Da der Anspruch an das Modell während der Entwicklung die landesweite Anwendbarkeit war, muss das Modell nicht kalibriert werden (Steinbrich und Weiler, 2012a). Die Ergebnisdaten umfassen die Abflusskonzentration jeder Abflusskomponente, sowie räumlich verteilte Daten für jeden Zeitschritt und Parameter. Da der Fokus in dieser Arbeit auf der Untersuchung der zeitlichen und räumlichen Entwicklung der Oberflächenabflüsse im Laufe einzelner starker Niederschlagsereignisse liegt, wird mit der Version Roger dynamo gearbeitet.

RoGeR ist in Python 2.7.6 64 bit geschrieben und wird unter Windows als ausführbare EXE-Programmdatei angewandt (Professur für Hydrologie, 2017). Die von RoGeR benötigten Eingangsdaten wurden mit ArcGIS in der Version 10.6.1 des Herstellers ESRI aufbereitet und werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

4.5.1.1 Modellvorstellung & Abflussbildungsprozesse in RoGeR

Die Modellvorstellungen der in RoGeR implementierten Prozesse sind in Abbildung 4.22 zusammenfassend dargestellt. Fallender Niederschlag wird entweder vom Interzeptionsspeicher

zurückgehalten oder trifft direkt auf die Erdoberfläche. Dort infiltriert er oder fließt oberflächlich als Horton'scher Oberflächenabfluss (HOA) ab, sofern die Infiltrationskapazität des Bodens durch zu hohe Niederschlagsintensitäten überschritten wird. Die Infiltration in den Boden wird durch die Bodeneigenschaften, die Vorfeuchtebedingungen und den Versiegelungsgrad maßgeblich bestimmt. Infiltrierendes Wasser sättigt den Boden von der Oberfläche ausgehend langsam auf und bildet eine in die Tiefe fortschreitende Sättigungsfront aus. Oberflächlich als HOA abfließendes Wasser kann zu gewissen Teilen durch Makroporen und Schrumpfungsrisse in den Boden infiltrieren (MP-INF) und somit zur Aufsättigung des Bodens beitragen. Ist die Feldkapazität des Bodens überschritten, setzt über das frei drainbare Porenvolumen die Tiefenperkolation (TP) des Wassers in tiefere Schichten ein. Je nach Bodeneigenschaften und der dem Boden unterliegenden Geologie erreicht das Wasser entweder das Grundwasser oder wird an einer geringdurchlässigen Schicht aufgestaut. Das aufgestaute Wasser füllt das freie Porenvolumen von unten her auf und kann entlang eines Gefälles Zwischenabfluss (ZA) ausbilden. Differenziert wird zwischen einer langsamen Matrixabflusskomponente (Matrix-ZA) und einer schnellen Abflusskomponente in lateralen Hohlräumen und Makroporen (MP-ZA). Ist der Boden vollständig aufgesättigt, was bei flachgründigen und geringdurchlässigen Böden oder hoch anstehendem Grundwasser besonders der Fall sein kann, entsteht an der Erdoberfläche Sättigungsflächenabfluss (SFA) (Steinbrich und Weiler, 2012a).

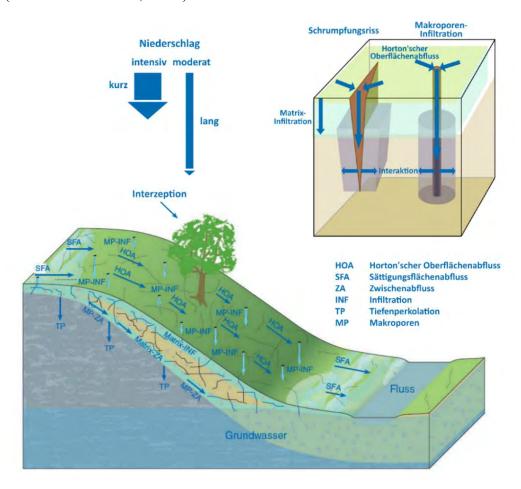


Abbildung 4.22 Schematische Darstellung der in RoGeR implementierten Prozesse und Komponenten der Abflussbildung (Steinbrich et al., 2016a, verändert)

4.5.1.2 Modellparameter und Datengrundlage

Die von RoGeR benötigten Modellparameter sind in Tabelle 4.5 aufgelistet und können auf Grund ihrer Ereignisabhängigkeit oder -unabhängigkeit differenziert werden. Zu den ereignisunabhängigen Parametern gehören beständige Gebietseigenschaften, die über die Zeit nur wenig Veränderung erfahren. Ereignisabhängige Parameter sind Gebietseigenschaften, die von Ereignis zu Ereignis unterschiedlich ausfallen können. Die Eingangsdatensätze werden entweder als räumlich verteilte GIS-Daten im Floating-Binary-Format oder in tabellarischer Form, welche mit räumlich verteilten Daten verknüpft werden, in das Modell eingepflegt. Die räumliche Auflösung der Eingangsdaten definiert die räumliche Auflösung, mit der im Modell modelliert wird. Die momentan höchste verfügbare Auflösung der Eingangsdaten liegt bei 1 m x 1 m. Alle Eingangsdatenraster müssen in der gleichen räumlichen Auflösung und Ausdehnung vorliegen. Als Kontrolle dient hier die Dateigröße, welche exakt gleich groß sein muss. Die zeitliche Auflösung wird durch die Intervalllänge der Niederschlagsdaten definiert. Der Niederschlag kann RoGeR entweder als räumlich differenzierter Gebietsniederschlag in Form von Rasterdaten oder in tabellarischer Form als gleichförmiger Gebietsniederschlag in Form einer .txt-Datei übergeben werden. In dieser Arbeit findet die letztere Variante Anwendung. Genauere Erläuterungen folgen in Kapitel 4.5.2.

Die in dieser Arbeit genutzten Datensätze der Eingangsparameter in 1 m x 1 m Auflösung, wurden an der Professur für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg i.Br. im Rahmen des vom Land Baden-Württemberg in Auftrag gegebenen Starkregenprojektes welches die Oberflächenabflusskennwerte hervorbrachte - in der ersten Projektphase flächendeckend für Baden-Württemberg generiert. In der noch laufenden zweiten Projektphase wurden bereits einige Methodiken zur Generierung der Datensätze der Eingangsparameter überarbeitet und lagen teilweise schon zur Nutzung bereit. Dies war der Fall für die Datensätze der Versiegelungsgrade, der Landnutzung und der Vorfeuchte (Steinbrich et al., 2018; Steinbrich und Weiler, 2019). In den folgenden Kapiteln wird die Parametrisierung der einzelnen Datensätze in Verbindung mit deren Verwendung im Modell näher erläutert.

Tabelle 4.5 Modellparameter in RoGeR (Steinbrich et al., 2016a)

Modellparameter	Einheit
Ereignisunabhängig	
Landnutzung	(-)
Versiegelungsgrad	(-)
Gefälle	(-)
Makroporendichte (vertikal)	(L^{-2})
Makroporenlänge (vertikal)	(L)
Makroporendichte (hangparallele)	(L^{-2})
Mittlerer Trockenrissabstand	(L)
Grundwasserflurabstand	(L)

	Bodenmächtigkeit	(L)
	Nutzbare Feldkapazität (nFK)	(—)
	Luftkapazität (LK)	(—)
	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bodens	$(L T^{-1})$
	Saugspannung an der Sättigungsfront	(L)
	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit unterhalb des Bodens	$(L T^{-1})$
	Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses (HOA)	$(L T^{-1})$
	Fließgeschwindigkeit des schnellen (präferenziell) Zwischenabflusses (MP-ZA)	$(L T^{-1})$
	Fließgeschwindigkeit des langsamen (Matrix) Zwischenabflusses (Matrix-ZA)	$(L T^{-1})$
	Grundwasserfließgeschwindigkeit	$(L T^{-1})$
Ereign	iisabhängig	
	Interzeptionsspeicher	(L)
	Freie nutzbare Feldkapazität	()
	Freie Luftkapazität	()
	Trockenrisstiefe	(L)
Zeitscl	hrittabhängig	
	Niederschlag	$(L T^{-1})$

4.5.1.3 Allgemeine Datenaufbereitung

Einige Datensätze beinhalten grundlegende Informationen, die einen Einfluss auf die Parametrisierung und Aufbereitung weiterer benötigter Eingangsdatensätze zur spezifischeren Beschreibung der Teilprozesse der Abflussbildung haben. In diesem Kapitel wird vorerst deren Aufbereitung und Herkunft erläutert, um im folgenden Kapitel 4.5.1.4, im Rahmen der Erläuterung der Aufbereitung weiterer Datensätze, Bezug auf diese zu nehmen.

Digitales Geländemodell

Das digitale Geländemodell (DGM) bildet mit der Abbildung der Geländeoberfläche die Grundlage zur Modellierung des räumlichen Oberflächenabflussgeschehens. Es lag als Rasterdatensatz mit einer räumlichen Auflösung von 1 m x 1 m vor und wurde dem Institut für Hydrologie vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL) bereitgestellt. Diese führten von 2000 bis 2005 Laserscanflüge von Baden-Württemberg mit einer Auflösung von ca. 0,8 Punkten/m² durch. Über ein Interpolationsverfahren wurde daraus ein regelmäßiges Gitter abgeleitet (LGL, 2019).

Das DGM gibt die Geländeoberfläche ohne Vegetation und Gebäude wieder. Besonders Gebäudestrukturen sind für Oberflächenabflussanalysen in urbanen Gebieten jedoch von elementarer Wichtigkeit, weshalb die im Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) zum Stand 2018 dokumentierten Gebäude in das DGM integriert wurden. Um sicherzustellen, dass Gebäude im Modell um- und nicht überflossen werden, wurde ihnen ein deutlich höherer Wert als den umgebenden Flächen zugeordnet. Zu den umgebenden Flächen gehören Straßen und andere geringere Erhebungen,

die während Starkregenereignissen, je nach Intensität, mit höherer Wahrscheinlichkeit überflutet werden. Im Folgenden wird auf sie als Flächen auf Straßenniveau Bezug genommen, um sie von Flächen auf Gebäudeniveau zu unterscheiden.

Landnutzung und Versiegelungsgrad und Rauigkeit

Die Rasterdaten zur Landnutzung basieren auf Informationen aus dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS). Dabei wird zwischen 14 Landnutzungsklassen unterschieden:

Teilweise oder ganz versiegelte Flächen (Siedlung, Industrie, Infrastruktur...), Ackerland, Weinbauflächen, Obst- und Beerenobst, Grünland, Komplexe Parzellenstruktur, Laubwälder, Mischwälder, Nadelwälder, Feuchtflächen, Wasserflächen See, Baumart unbekannt, Wasserfläche Fluss.

Versiegelte Flächen werden noch weiter je nach Grad der versiegelten Fläche zwischen 0 und 100 % differenziert. Sie werden dem Modell als eigener Rasterdatensatz übergeben. In Kapitel 4.1 sind die Landnutzung und der Versiegelungsgrad für die EZG grafisch dargestellt.

Abgrenzung der Einzugsgebiete

Um den zu modellierenden Bereich genauer zu definieren muss RoGeR eine Einzugsgebietsmaske übergeben werden. Die Raster innerhalb des Modellierungsbereichs bekommen den Wert 1 zugewiesen; die Rasterzellen außerhalb bekommen die Information noData. Die Erstellung der Maske erfolgt mittels ArcGIS und der darin enthaltenen hydrologischen Werkzeuge. Aus dem DGM wird zunächst die Fließrichtung einer jeder Rasterzelle berechnet um anschließend daraus die Fließwege zu berechnen. Über die Fließwege können Rasterzellen identifiziert werden, die Gebietsauslässe von EZG unterschiedlicher Größe darstellen. Über eine ausgewählte Gebietsauslasszelle und das DGM werden schlussendlich die oberirdischen Einzugsgebiete definiert.

4.5.1.4 Parametrisierung der Teilprozesse der Abflussbildung

Interzeption und Muldenspeicher

Die Menge des durch Vegetation zurückgehaltenen Niederschlags wird abhängig von Jahreszeit und Landnutzung über den Blattflächenindex geschätzt und entspricht der von Bremicker (2000) gewählten Methodik für das Modell LARSIM. Der über Vegetation gefallene Niederschlag erreicht den Boden erst, wenn die Speicherkapazität der Interzeption überstiegen ist. Da RoGeR als ein ereignisbasiertes Modell entwickelt wurde, ist Verdunstung aus dem Interzeptionsspeicher noch nicht implementiert. Bevor Wasser in den Boden infiltriert, kann es noch in kleineren Mulden gespeichert werden. Die Parametrisierung ist von der Landnutzung und der Bodenversiegelung abhängig (Steinbrich et al., 2016a).

Matrixinfiltration

Böden können als "Dreiphasensystem" beschrieben werden. Es setzt sich aus dem festen Bestandteil (Bodenmatrix), der Flüssigphase und der Luftphase zusammen. Die Volumina der Flüssigphase und der Luftphase bilden gemeinsam das Poren- bzw. Hohlraumvolumen. Das Porenvolumen und das Volumen der Festphase bilden wiederum das Gesamtvolumen. Die Bodenmatrix setzt sich neben der organischen Komponente aus Körnern unterschiedlicher Größe zusammen. Deren Häufigkeitsverteilung resultiert in der Einteilung in verschiedene Bodenarten, wie sie in der "Bodenkundlichen Kartieranleitung" (KA5) in den Feinbodenklassen definiert sind (Abb. 4.23) (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005). Die Lagerung der Körner bestimmt die Porosität, die das Verhältnis aus Porenvolumen und Gesamtvolumen darstellt. Das Porenvolumen ist durch unterschiedlich große Poren charakterisiert, welche über ihren Äquivalentdurchmesser beschrieben werden. Die Grenzen der Porengrößeneinteilung sind an Kennwerten des Bodenwasserhaushalts festgemacht, da diese Bodeneigenschaften eng miteinander zusammenhängen. Sehr enge Poren binden Wasser deutlich stärker als weite Poren. Die Stärke der Bindung wird über die Saugspannung und den pF-Wert ausgedrückt und bestimmt wie beweglich das Wasser in der Bodenmatrix ist. Als frei beweglich wird das Wasser in den weiten Grobporen bezeichnet. Dieser Teil des Porenvolumens wird auch Luftkapazität (LK) oder frei drainbares Porenvolumen genannt. Ist er nach einem Niederschlagsereignis entwässert, ist der Zustand der Feldkapazität (FK) erreicht, womit die Wassermenge bezeichnet wird, die der Boden gegen die Schwerkraft halten kann. Zieht man von der Wassermenge zum Zustand der Feldkapazität das Totwasser ab erhält man die nutzbare Feldkapazität (nFK). Totwasser bezeichnet die im Boden enthaltene Wassermenge zum Zeitpunkt des permanenten Welkepunkts. Das Wasser ist in den Feinporen so fest gebunden, dass es für Pflanzen nicht nutzbar ist.

Das effektive Porenvolumen, auch durchflusswirksames Porenvolumen genannt, ist das Teilvolumen des gesamten Hohlraumvolumens, in dem die effektive Wasserbewegung stattfindet und somit die Durchlässigkeit des Bodens definiert. Ein hohes Gesamthohlraumvolumen steht in keinem direkten Zusammenhang mit der Durchlässigkeit, da diese nur von verbundenen Poren definiert wird (Hölting und Coldewey, 2013). Eine Zusammenfassung der Kennwerte zum Wasser- und Lufthaushalt des Bodens ist in Tabelle 4.6 gegeben.

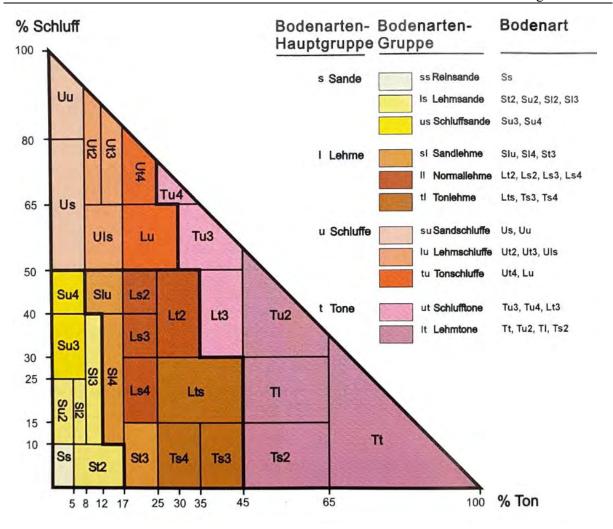


Abbildung 4.23 Feinbodenklassen entsprechend der KA5 (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005)

Tabelle 4.6 Definition der Kennwerte zum Wasser- und Lufthaushalt des Bodens (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005)

Saugspannung in hPa	< 60	60 bis < 300	300 bis < 15 000	≥ 15 000
pF-Wert	< 1,8	1,8 bis < 2,5	2,5 bis < 4,2	≥ 4,2
Porenäquivalent in µm	> 50	50 bis > 10	10 bis > 0,2	≤ 0,2
Porenbezeichnung	weite Grobporen	enge Grobporen	Mittelporen	Feinporen
Bodenwasser	schnell bewegliches	langsam bewegliches	pflanzen- verfügbares	nicht pflanzen- verfügbares
Kennwerte	Sickerwasser		Haftwasser	
	Luftkapazität	nutzbare Feldkapazität (nFK)		Totwasser
	(LK)	Feldkapazität (FK)		
	Gesamtporenvolumen (V_{Peff})			

Die Infiltration in die Bodenmatrix ist in RoGeR über einen Ansatz von Green und Ampt (1911), der durch Peschke (1985) für zeitvariable Niederschlagsintensitäten modifiziert wurde, implementiert (zitiert nach Steinbrich et al., 2016a). Die Annahme hinter dem Green-Ampt-Ansatz ist die Ausbildung einer gleichmäßigen Sättigungsfront. Das abwärts gerichtete Voranschreiten der Sättigungsfront hängt von der Saugspannung an der Sättigungsfront, der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, dem effektiven Porenvolumen und der Niederschlagsintensität ab. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde für die in der KA5 klassifizierten Feinbodenarten und die unterschiedlichen Bodenhorizonte in der Bodenkarte von Baden-Württemberg 1:50.000 (BK50) parametrisiert und konnte dieser entnommen werden. Die Saugspannung an der Sättigungsfront, die sich zwischen der gesättigten und ungesättigten Bodenzone ausbildet, wird über den Ansatz von Mein und Larson (1973) über die Wasserretentionskurve abgeschätzt. Ergänzt wurde er durch die Anwendung eines nach Ippisch et al. (2006) modifzierten Mualem-van Genuchten Models, dessen Parameter für die Texturklassen der KA5 aus Wessolek et al. (2009) entnommen wurden (Steinbrich et al., 2016b). Das effektive Porenvolumen ist in RoGeR als die Summe aus nutzbarer Feldkapazität (nFK) und der Luftkapazität (LK) definiert. Die Werte der einzelnen Parameter konnten ebenfalls der BK50 entnommen werden. Das effektive Porenvolumen geht als die dimensionslose Größe der effektiven Porosität in das Modell ein. Während des Modelllaufs wird die Tiefe der Sättigungsfront und somit die potenzielle Matrixinfiltration für jeden Zeitschritt und jede Rasterzelle berechnet. Ein weiterer Faktor mit limitierender Wirkung auf die Infiltration in die Bodenmatrix ist der Grad der Versiegelung der Erdoberfläche (Steinbrich und Weiler, 2012a).

Infiltration durch Makroporen und Schrumpfungsrisse

Laut Scherrer (1997) reichen die Eigenschaften der Bodenmatrix nicht aus um das Infiltrationsvermögen korrekt abschätzen zu können. Dies sieht er in der Rolle der Makroporen und Schrumpfungsrisse, oder auch präferentielle Fließwege genannt, begründet. Der Prozess tritt jedoch erst ein, wenn HOA auftritt und spielt in dessen Verringerung eine wichtige Rolle. Die Menge des durch Makroporen infiltrierenden Wassers wird durch die Makroporendichte und die Interaktion zwischen den Makroporen und dem Boden bestimmt (Weiler und Flühler, 2004; Steinbrich et al., 2016a). Dabei breitet sich in der Modellvorstellung in horizontaler Richtung eine von der Pore ausgehende radiale Sättigungsfront aus, die über einen modifizierten Green & Ampt Ansatz implementiert ist. Durch fortschreitende Infiltration wird die Makroporenlänge pro Zeitschritt reduziert. Die Makroporendichte wird in RoGeR über die Landnutzung und den Versiegelungsgrad definiert und die Länge der vertikalen Makroporen über die Landnutzung und die Bodengründigkeit (Professur für Hydrologie, o.J.a). Dominierende Prozesse zur Entstehung von Makroporen sind Aktivitäten von Tieren (besonders Regenwürmer), die Durchwurzelung des Bodens und die Entstehung von Rissen in Tonböden durch Quellen und Schrumpfen durch wechselnd feuchte und trockene Bedingungen (Casper, 2002; Scherrer, 2006).

Bodenspeicher und Ereignisvorfeuchte

Der Bodenspeicher wird über die Matrixinfiltration und die Infiltration über präferentielle Fließwege gefüllt. Der potenzielle Bodenspeicher zu Beginn eines Niederschlagsereignisses, der über die Ereignisvorfeuchte quantifiziert wird, setzt sich in RoGeR aus der frei verfügbaren LK und der frei verfügbaren nFK zusammen. Für die Modellierung wird davon ausgegangen, dass zwischen den Niederschlagsereignissen so viel Zeit liegt, dass die LK vollständig entwässert ist. Somit wird der noch verfügbare Bodenspeicher zu Beginn des Niederschlagsereignisses alleinig über die Füllmenge der nFK definiert (Steinbrich und Weiler, 2012a).

Die Datensätze der Ereignisvorfeuchten für die Ereignisse 2016 und 2018 wurden über eine Wasserhaushaltsmodellierung mit RoGeR WBM über einen Zeitraum von 11 Jahren abgeleitet. Da sich unterschiedliche Standorte auf Grund der hydroklimatischen und physiographischen Gegebenheiten stark in ihren Bodenfeuchtespannweiten unterscheiden und anhand der Absolutwerte nicht zu vergleichen wurden über die Wasserhaushaltsmodellierung flächendeckende sind, Bodenfeuchteperzentile der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten ermittelt. Diese wurden aus Bodenfeuchtewerten gebildet, die zu Beginn eines Niederschlagsereignisses vorlagen. Da Starkregenereignisse vermehrt in den Sommermonaten auftreten, wurden die zugrundeliegenden kumulierten Häufigkeitsverteilungen nur aus Werten gebildet, die innerhalb der hydrologischen Sommer liegen. Die Unabhängigkeit der Niederschlagsereignisse wurde über eine minimale Niederschlagspause von 6 h definiert. Diesem Ansatz entsprechend wurde davon ausgegangen, dass die weiten Grobporen (LK) zu Beginn des neuen Niederschlagsereignisses komplett Wasserentleert waren, was eine Voraussetzung der landesweiten Szenarienmodellierung im Rahmen des WaBoA-Projekts war (Steinbrich und Weiler, 2012a).

Um nun die Ereignisvorfeuchte für die hier modellierten Niederschlagsereignisse zu ermitteln, wurde die gleiche Methodik auf Bodenfeuchte-Messdaten von zwei Wetterstationen - Unterer Lindenhof (U.L.) und Oberer Lindenhof (O.L.) – angewandt. Die Wetterstationen liegen östlich des Reutlinger Stadtgebiets und werden vom Landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg (LTZ) betrieben (Abb. 4.25). Die Station "Unterer Lindenhof" liegt bei 48.47° Nord und 9.30° Ost auf 473 m über NN und misst die Bodenfeuchte in einem tonigen Lehm. Die Station "Oberer Lindenhof" liegt bei 48.47° Nord und 9.27° Ost auf 720 m über NN und misst die Bodenfeuchte in einem schluffigen Lehm. Die Daten sind online frei zugänglich und seit dem 01.12.2014 in einer minimalen zeitlichen Auflösung von einer Stunde verfügbar. Die hier verwendete Messreihe beginnt am 01.12.2014 und endet am 08.07.2019. Die Uhrzeit der Daten bezieht sich auf die mitteleuropäische Zeit (MEZ) (LTZ, 2019b).

Für die Bodenfeuchtemessung sind an den Wetterstationen Bodenfeuchte-Messsensoren des Typs CS650 der Firma Campbell verbaut. Sie messen die volumetrische Bodenfeuchte in einer Tiefe von 20 cm. Die Genauigkeit der Messwerte liegt bei \pm 1 %, wenn eine Boden-spezifische Kalibrierung erfolgte und bei \pm 3 %, wenn die Kalibrierung über ein "Volumetrisches-Wassergehalts-(VWC)-Model

und einer Lösung mit einer elektrischen Leitfähigkeit von ≤ 3 sd/m erfolgte. Die Genauigkeit der Angabe der Messwerte liegt bei < 0,05 % (Campbell Scientific Ltd., 2018).

Bevor die Daten veröffentlicht werden, durchlaufen sie ein Prüfverfahren mittels eines Plausibilisierungsprogramms. Dabei werden die Daten auf Konsistenz- und Dynamikfehler und Überschreitung von oberen und unteren Grenzwerten unter Bezugnahme auf die Jahreszeit getestet. Des Weiteren erfolgt ein Abgleich mit Messwerten von benachbarten Stationen. Wird eine Fehlermeldung ausgegeben, wird der automatischen Kontrolle eine manuelle Kontrolle angeschlossen. Gebildete Ersatzwerte sind Mittelwerte aus 3 bis 5 benachbarten Stationen, die ihrer Lage nach gewichtet werden. Ein Ersatz von Maximum- und Minimum-Werten durch benachbarte Stationen wird nicht vorgenommen. Die Sensoren der Wetterstationen werden zu Beginn der Vegetationsperiode innerhalb von ca. sieben Wochen auf ihre Funktionsfähigkeit geprüft und gereinigt und im Falle eines Ausfalls ersetzt und neu kalibriert (LTZ, 2019a).

In Abbildung 4.24 sind die kumulierten Häufigkeitsverteilungen der Wetterstationen U.L. und O.L. für das gesamte Jahr, den hydrologischen Sommer und den hydrologischen Winter dargestellt. Dafür wurden

wie bereits erwähnt, aus den Zeitreihen des U.L. und des O.L. die Bodenwassergehalte zu Beginn eines Niederschlagsereignisses extrahiert. Für den U.L. ergab sich für den hydrologischen Sommer eine Zeitreihenlänge von 349 Werten und für den O.L. von 405 Werten. Über die Häufigkeitsverteilung des hydrologischen Sommers wurden für die zu Beginn der Ereignisse vorherrschenden Bodenwassergehalte die entsprechenden Perzentile ermittelt.

Oberer und Unterer Lindenhof Zeitreihenlänge: 01.12.2014 - 08.07.2019

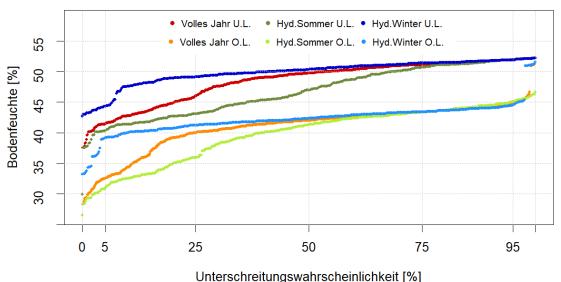


Abbildung 4.24 Häufigkeitsverteilungen der extrahierten Vorereignis Bodenfeuchten für den hydrologischen Sommer, Winter und das ganze Jahr an den Stationen U.L. und O.L.

Für das Ereignis am 11. Juni 2018 wurde der Bodenwassergehalt um 16 Uhr als die Ereignisvorfeuchte festgesetzt, obwohl das in dieser Arbeit modellierte Ereignis erst um 19 Uhr begann. Dies liegt an der Definition der Ereignisunabhängigkeit über eine Niederschlagspause von 6 h und daran, dass um 16 Uhr an den Stationen U.L. und O.L. Niederschlag fiel. Die Bodenwassergehalte um 16 Uhr lagen bei 46 Vol% an der Station U.L. und 38,5 Vol% an der Station O.L.. Die über die Häufigkeitsverteilung ermittelten Perzentilwerte lagen damit bei 48,9 und 32. Über den Mittelwert der Perzentilwerte der beiden Stationen wurde der Vorereigniseingangsdatensatz für RoGeR auf die Bodenfeuchtewerte des 40er Perzentils festgelegt. Von der Methodik abweichend wurden auch die Bodenfeuchtegehalte und Perzentilwerte für 19 Uhr ermittelt, welche etwas höher waren.

Für das Ereignis am 24. – 25. Juni 2016 wurden an den Wetterstationen U.L. und O.L. Bodenwassergehalte von 52 Vol% und 46,7 Vol% ermittelt, die den Perzentilen von 97 und 100 entsprechen. Eine Übersicht der Bodenfeuchtewerte und der dazugehörigen Perzentilwerte für die einzelnen Stationen und Ereignisse ist in Tabelle 4.7 gegeben. Auf Grund des begrenzten Zeitrahmens dieser Arbeit und der sehr hohen Perzentilwerte für das Ereignis 2016, wurden alle Modellierungsläufe mit den gleichen Vorfeuchtebedingungen des 40er-Perzentils durchgeführt.

Tabelle 4.7 Zusammenfassung der an den Stationen Oberer und Unterer Lindenhof ermittelten Vorfeuchtebedingungen der Ereignisse 2016 und 2018

	Unterer Linden	hof	Oberer Lindenhof			
Во	odenart: toniger Le	ehm (Lt)	Bod	enart: schluffiger l	Lehm (Lu)	
Ereignisbeginn 24.06.2016,	Bodenfeuchte	Unterschreitungs- wahrscheinlichkeit [%] (hydrologischer Sommer)	Ereignis- beginn 24. 06. 2016	Bodenfeuchte	Unterschreitungs- wahrscheinlichkeit [%] (hydrologischer Sommer)	
22:00 Uhr	52 %	97	22:00 Uhr	46,7 %	100	
11. 06. 2018, 16:00 Uhr	46,7 %	49	11. 06. 2018, 16:00 Uhr	38,5 %	32	
11. 06. 2018, 19:00 Uhr	51 %	78	11. 06. 2018, 19:00 Uhr	40,2 %	42	

Tiefenperkolation

Die Tiefenperkolation wurde durch Kombination der hydrogeologischen Karte im Maßstab 1:50 000 (HGK50) und der BK50 parametrisiert und in RoGeR in Millimetern pro Stunde angegeben. Sie bildet einen elementaren Parameter in Hinsicht auf die Bildung des Zwischenabflusses.

Sie wird zum einen durch die Durchlässigkeit des geologischen Untergrunds und durch – wo vorhanden – die Deckschichten bestimmt, und zum anderen über potenziell vorhandene geringdurchlässige Unterböden. Der HGK50 wurden Durchlässigkeitswertebereiche für die

geologischen Einheiten und die Deckschichten entnommen. Da die Durchlässigkeiten geologischer Einheiten in Intervallen angegeben werden, RoGeR die Informationen in der Form jedoch nicht verarbeiten kann, wurden harmonische Mittelwerte gebildet. Diese bewegen sich im Bereich zwischen < 0,01 und 65454,55 mm/h. Die Durchlässigkeiten der Deckschichten wurden über vergleichbare Klassen der Durchlässigkeiten der geologischen Einheiten definiert und sind im Bereich von 0,01 und 65,45 mm/h. Sofern Deckschichten vorhanden waren, wurden der Tiefenperkolation an diesen Stellen die Durchlässigkeitswerte der Deckschichten zugewiesen. Wo keine Deckschichten vorlagen wurden die Werte der geologischen Einheiten als maßgebend definiert. War in der BK50 ein Unterboden mit geringerer Durchlässigkeit als der des unterliegenden Gesteins und des Oberbodens dokumentiert, lag die für die Definition von TP und ZA relevante Grenze zwischen Ober- und Unterboden. Dabei durften die Durchlässigkeitswerte des Unterbodens 5 mm/h nicht übersteigen und die Differenz zur Durchlässigkeit des Oberbodens musste mindestens 5 mm/h betragen (Steinbrich et al., 2016b).

Oberflächenabfluss

Die Kombination aus Bodenspeicher, Tiefenperkolation, Interzeptions- und Muldenspeicher und Matrix-, Makroporen- und Trockenrissinfiltration bestimmt schlussendlich die Bildung und Konzentration von Oberflächenabflüssen. Wird die Infiltrationsleistung des Bodens überschritten bildet sich HOF. Ist der Boden vollständig aufgesättigt bildet sich SFA. Da ZA und TP für die Fragestellung dieser Arbeit irrelevant sind, werden sie nicht weiter betrachtet.

Die Berechnung der Fließgeschwindigkeiten auf der Geländeoberfläche im Rahmen der hydraulischen Modellierung ist in RoGeR über die Gauckler-Manning-Strickler(GMS)-Fließformel eingepflegt. Die Fließgeschwindigkeit wird für jeden Zeitschritt und jede Rasterzelle in Abhängigkeit der Überflutungstiefe und der Rauigkeit der Geländeoberfläche berechnet (Leistert, 2019). Die Rauigkeit ist über die Landnutzungsklasse parametrisiert (Professur für Hydrologie, o.J.b).

Kanalisation und Verdolungen

In RoGeR dynamo ist die Möglichkeit gegeben die Kanalisation und Verdolungen zu integrieren. Aufgrund der Größe der modellierten EZG hätte die Integration der Kanalisation in die Modellierung einen immensen Zeitaufwand dargestellt, der den zeitlichen Rahmen weit überschritten hätte. Deshalb wurde die Modellierung ohne Berücksichtigung der Kanalisation durchgeführt.

4.5.2 Szenarienmodellierung mit RoGeR

Um die EZG auf ihre Reaktion auf unterschiedliche Niederschläge hin zu untersuchen, wurden mit RoGeR verschiedene Szenarien modelliert. Dabei bezieht sich der Begriff "Szenarienmodellierung" auf einen variierenden Niederschlags-Input. Da es während der Ereignisse 2016 und 2018

Schadensmeldungen gab (vergl. Abb. 4.11), sollte untersucht werden, ob sich der über einem EZG niedergegangene Niederschlag in einem anderen EZG anders geäußert hätte.

Über die Messwerte der Bodenstationen wurde der über jedem EZG gefallene Niederschlag für die einzelnen Ereignisse quantifiziert und für die Modellierung mit RoGeR aufbereitet. Die definierten Gebietsniederschläge wurden in weiteren Modellläufen auf die jeweils anderen EZG angewandt. Eine detaillierte Erläuterung zur Definition der Gebietsniederschläge folgt in Kapitel 4.5.2.1. Eine Übersicht zu den durchgeführten Modellläufen ist in Tabelle 4.8 gegeben.

Tabelle 4.8 Zusammenfassung der durchgeführten Szenarienmodellierungen mit RoGeR

		2016		
		EZG	EZG	EZG
		Zentrum Achalm	Zentrum Nord	Gönningen
Gebiets-NS Zentrum Achalm	(Nd. ACH)	✓	✓	✓
Niederschlag S 11	(Nd. S11)	✓	✓	✓
Gebiets-NS Zentrum Nord	(Nd. NO)	✓	✓	✓
Gebiets-NS Gönningen	(Nd. GOE)	✓	✓	✓
		2018		
		EZG	EZG	EZG
		Zentrum Achalm	Zentrum Nord	Gönninger
Gebiets-NS Zentrum Achalm	(Nd. ACH)	√	√	✓
Gebiets-NS Zentrum Nord	(Nd. NO)	✓	✓	✓
Gebiets-NS Gönningen	(Nd. GOE)	✓	✓	✓

4.5.2.1 Niederschlagsinput

Die Szenarienmodellierung wurde mit gleichförmigen Gebietsniederschlägen durchgeführt. Diese wurden RoGeR in Form von .txt.-Dateien übergeben. Die Datengrundlage bilden die Messwerte des Bodenniederschlagmessnetzes, deren Datenaufbereitung in Kapitel 5.2.2.1 erläutert wurde. Die übergebenen Zeitreihenlängen entsprechen der Ereignisdauer des betroffenen EZGs. Die Modellierungszeiträume wurden so gewählt, dass der von der Station erfasste niederschlagsintensivste Teil enthalten ist. Demnach wurde das Ereignis 2016 nur zwischen ca. 21:45 und 23:00 Uhr modelliert, da die Niederschlagsintensitäten zwischen 23:00 und 4:00 Uhr vernachlässigbar gering waren. Die verlängerte Dauer des Modelllaufs hätte in keinem Verhältnis zum Ergebnis gestanden. Auf identische Start- und Endzeiten wurde nicht geachtet, da sich die niederschlagsintensivsten Zeiträume von Station zu Station, entsprechend des in Kapiteln 4.2.1 und 4.2.1 erläuterten Durchzugs des Ereignisses unterschieden. Tabelle 4.9 fasst die Start- und Endzeitpunkte für beide Niederschlagsereignisse und das jeweilige EZG zusammen.

Mittels Thiessen Polygonen, einer in der Hydrologie gängigen Methode zur Ermittlung von Gebietsniederschlägen aus Punktmessungen, wurden die räumlichen Anteile der Niederschlagsstationen

an den EZG ermittelt (Abb. 4.25). Die Gebietsniederschlagszeitreihen wurden durch die Bildung des gewichteten Mittels aus den Stationsniederschlagszeitreihen berechnet. Welche Station zu welchem Anteil in den Gebietsniederschlag welches EZGs einging, kann ebenfalls aus Tabelle 4.9 entnommen werden. Eine visuelle Darstellung der Stationsniederschläge und den daraus gebildeten Gebietsniederschlagszeitreihen ist für das Ereignis 2016 in Abbildung 4.26 und für das Ereignis 2018 in Abbildung 4.27 gegeben.

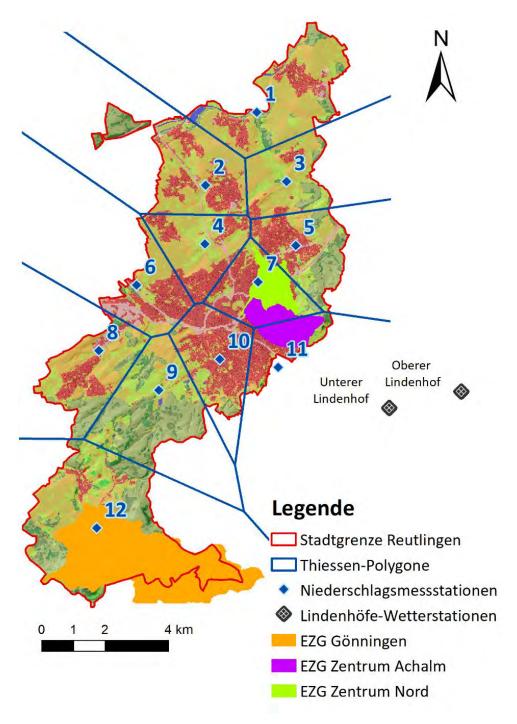


Abbildung 4.25 Thiessen-Polygone zur Bildung der Gebietsniederschläge (Nd. ACH, Nd. NO und Nd. GOE) jedes EZGs

Tabelle 4.9 Zusammenfassung der Thiessen-Polygon-Anteile der Niederschlagsstationen an den modellierten EZG, den daraus resultierenden Gebietsniederschlägen für die Modellierung mit RoGeR

	Zentrum	Achalm	Zentru	m Nord	Gönningen
EZG Größe	2,16	km²	1,68	3 km²	11,6 km²
NS-Station	S 7	S 11	S 5	S 7	S 12
Thiessen-Polygon- Anteil am EZG	39 %	61 %	4 %	96 %	100 %

Ereignis am 24. Juni 2016

	8		
Modellierungs- zeitraum	21:47 – 23:03	22:00 – 22:55	21:49 – 22:46
Zeitreihenlänge	77	56	58
Ereignissumme Gebietsniederschlag	43,14 mm	24,24 mm	43,46 mm
Ereignissumme Einzelstation	S 7: 24,84 mm S 11: 54,86 mm	S 5: 17,73 mm S 7: 24,52 mm	

Ereignis am 11. Juni 2018

Modellierungs- zeitraum	18:52 – 19:56	18:52 – 19:56	18:47 – 19:39
Zeitreihenlänge	65	65	53
Ereignissumme Gebietsniederschlag	45,55 mm	43,68 mm	25,33 mm
Ereignissumme Einzelstation	S 7: 43,71 mm S 11: 46,7 mm	S 5: 42,44 mm S 7: 43,71 mm	

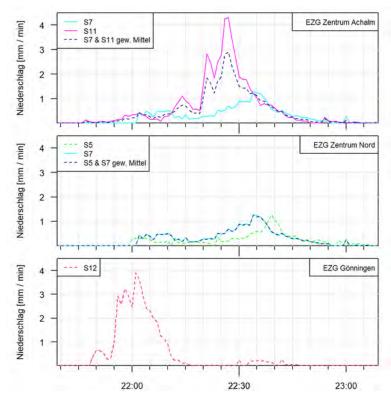


Abbildung 4.26 Grafik der Stations- und Gebietsniederschläge (S7 & S11 gew. Mittel und S5 & S7 gew. Mittel) des Ereignisses am 24.06.2016

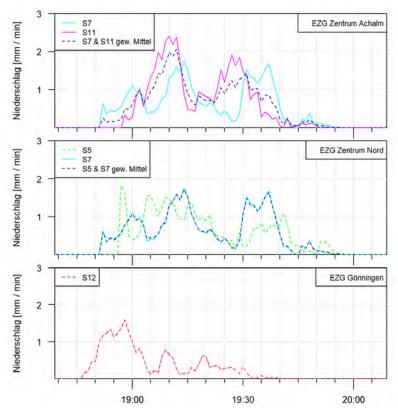


Abbildung 4.27 Grafik der Stations- und Gebietsniederschläge (S7 & S11 gew. Mittel und S5 & S7 gew. Mittel) des Ereignisses am 11.06.2018

4.5.3 Auswertung der Modellierungsergebnisse

Mit dem Ziel unterschiedliche EZG-Reaktionen zu identifizieren, wurden die Ergebnisdatensätze der ÜT und FG zur genaueren Analyse herangezogen. Diesen wurden in einem weiteren Schritt Gefahrenklassen zugeordnet. Die Validierung der Modellierungsergebnisse wird im letzten Kapitel kurz erläutert.

4.5.3.1 Auswertung der modellierten Überflutungstiefen und Fließgeschwindigkeiten

Entsprechend der im Leitfaden (LUBW, 2016) in Kapitel 2.3.4.1 ausgeführten Empfehlungen zur Erstellung der SRGK, wurden zur Auswertung der Modellierung die über das Ereignis hinweg erreichten Maximalwerte der ÜT und der FG pro Rasterzelle herangezogen.

Um die in den verschiedenen EZG über die verschiedenen Szenarien hinweg aufgetretenen maximalen ÜT und FG miteinander vergleichen zu können, wurden für die Auswertungen nur die auf versiegelten Flächen gebildeten ÜT und FG betrachtet, da sich der Anteil der versiegelten Fläche an der gesamten EZG-Fläche von EZG zu EZG unterscheidet (vergl. Kap. 4.1). Eine Differenzierung zwischen den unterschiedlichen Graden der Versiegelung erfolgte dabei nicht. Ein weiterer Grund für die alleinige Betrachtung der versiegelten Flächen ist das mit der Erstellung der SRGK verfolgte Interesse an der Identifikation von schadenverursachenden ÜT und FG in urbanen Gebieten.

Zur grafischen Auswertung der für die verschiedenen Szenarien modellierten ÜT wurden Säulendiagramme erstellt. Das gleiche erfolgte für die modellierten FG. Die Gruppierung der ÜT resultiert aus der Kombination der Darstellungsempfehlungen in Merkblatt DWA-M 119 (DWA, 2016) und dem Leitfaden (LUBW, 2016) (Tab. 4.10). Die Gruppierung der FG wurde direkt aus dem Leitfaden übernommen, da in Merkblatt DWA-M 119 keine Empfehlung vermerkt war.

Entsprechend Kapitel 2.3.4.2 erfolgt die Gefahrenklassenzuordnung nicht anhand der gesonderten Betrachtung der ÜT und der FG, sondern anhand deren Kombination. Somit wurden die während der Ereignisse überfluteten versiegelten Rasterzellen entsprechend beider Kriterien gruppiert und in eine Matrix übertragen.

Tabelle 4.10 Zusammengefasste Darstellung der zur Gruppierung der ÜT herangezogenen Grundlagen aus Merkblatt DWA-M 119 (DWA, 2016) und dem Leitfaden (LUBW, 2016)

Merkblatt DWA-M 119	Leitfaden	Kombinierte ÜT-Gruppierung
< 10 cm	5 – 10 cm	> 5 cm – 10 cm
10 – 30 cm	10 – 50 cm	> 10 cm – 30 cm
30 – 50 cm	10 30 cm	> 30 cm – 50 cm
> 50 cm	50 – 100 cm	> 50 cm – 100 cm
2 30 Cm	> 100 cm	> 100 cm

4.5.3.2 Gefahrenklassen

Der Vergleich der Reaktion der EZG auf ein und denselben Gebietsniederschlag soll nicht nur anhand der Häufigkeitsverteilungen der ÜT- und FG-Klassen erfolgen, sondern auch anhand von Gefahrenklassen. Somit soll ermittelt werden, ob in den verschiedenen EZG unterschiedliche Gefahren für Menschen, Autos und Gebäude entstehen. Dafür werden die von Smith et al. (2014) definierten Gefahrenklassen auf die im vorigen Kapitel erläuterten Matrizen der Kombinierten ÜT- und FG-Klassen übertragen. Eine grafische Darstellung der Kombination der Gefahrenkurven aus Abbildung 2.9 mit den ÜT- und FG-Klassen ist in Abbildung 4.28 gegeben.

Bei der Übertragung der Gefahrenklassen auf die Matrizen muss darauf geachtet werden, dass ÜT und FG in einem funktionalen Zusammenhang stehen und sich die von Smith et al. (2014) definierten Gefahrenklassen aus deren Produkt ergeben. Somit ergeben sich die konvexen Gefahrenklassengrenzen in Abbildung 4.28. Die durch ÜT- und FG-Klassen separierten Bereiche enthalten teilweise mehr als nur eine Gefahrenklasse. Ein Beispiel ist der Bereich zwischen ÜT = 0.5 - 1 m und FG 0.5 - 2 m/s, der H3, H4 und H5 enthält. Zur Übertragung auf die Matrizen wurden die Gefahrenklassen nicht zusammengefasst und gemittelt, sondern farblich differenziert dargestellt.

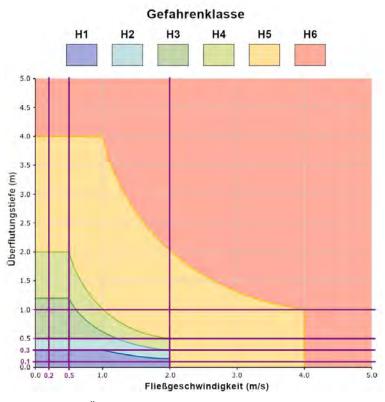


Abbildung 4.28 Kombination der ÜT- und FG-Klassen (lila Linien) mit den von Smith et al. (2014) definierten Gefahrenklassen

4.5.3.3 Validierung der Modellierungsergebnisse

Zur Validierung der modellierten FG und vor allem ÜT, wurden Feuerwehreinsatzdaten herangezogen und via Social Media nach Bild- und Videomaterial gesucht. Die Stadt Reutlingen hatte vom Ereignis 2018 Feuerwehr-Einsatzorte in digitaler "Shapefile"-Form vorliegen. Die Einsätze zum Ereignis 2016 lagen nur in Papierform vor und wurden direkt über die Feuerwehr der Stadt Reutlingen bezogen. Zur Weiterverarbeitung wurden sie in ArcGIS digitalisiert. Sofern Bildmaterial zu den Einsätzen vorhanden war, wurde dieses zusätzlich zur Verfügung gestellt. Die Feuerwehreinsätze des 11. Juni 2018 enthielten abgesehen vom Datum keinen genauen Zeitstempel und enthielten nur die Information "Wasser". Dies beinhaltet Wasser innerhalb und außerhalb von Gebäuden, wie auch unterschiedliche Überflutungsursachen, wie ausuferndes Fließgewässer, wild abfließendes Oberflächenwasser und Überflutung durch Überstau in der Kanalisation.

Da Smartphones mittlerweile weit verbreitet sind und die integrierte Kamera Schnappschüsse ermöglicht, ist die Zahl der in Fotos und Videos dokumentierten Naturereignisse gestiegen. Dementsprechend wurde eine Umfrage auf Social Media initiiert, in der Hoffnung Material von überfluteten urbanen Räumen während der Ereignisse zu erhalten.

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden erst die Ergebnisse zum SRI nach Schmitt et al. (2018) dargestellt, welche die Erstellung der SRI-Matrizen und den ereignisbezogenen SRI beinhalten. Im darauffolgenden Kapitel wird auf die Ergebnisse der Szenarienmodellierung mit RoGeR eingegangen. Dabei werden erst die während der Szenarienmodellierung maximal aufgetretenen ÜT und FG getrennt voneinander betrachtet. Im nächsten Schritt werden diese in Matrizen kombiniert. Mit den Gefahrenklassen wird die Vorstellung der Ergebnisse abgeschlosen.

5.1 SRI

5.1.1 SRI-Matrizen

Die Erstellung der Starkregenindexmatrizen für das Stadtgebiet Reutlingen auf Basis von KOSTRA ergab fünf Matrizen der gleichen Form. Zur Erläuterung ist nur die Matrix des KOSTRA-Rasters 87028 dargestellt. Alle fünf Matrizen sind in Anhang 4 zu finden. In horizontaler Richtung sind die Wiederkehrzeiten und die ihnen entsprechenden SRI aufgetragen. In vertikaler Richtung sind die Dauerstufen von 5 min bis 3 d dargestellt. Die SRI von 1 bis 12 können über die fest zugeordnete Farbe identifiziert werden.

Die Niederschlagshöhen der SRI von 1 bis 7 stehen in direktem Bezug zu Wiederkehrzeiten von $T_n=1$ a bis T=100 a. Damit unterscheiden sie sich von den SRI 8 bis 12, welchen keine Wiederkehrzeiten zugeordnet sind und die nur die verallgemeinernde Information $T_n=>100$ a enthalten. Zudem bestehen Unterschiede in der Definition der Geltungsbereiche. Die SRI von 8 bis 12 sind über ein obere und eine untere Grenze definiert, die SRI von 1 bis 7 nur über einen Wert. Dabei fallen Inkonsistenzen im Übergang von SRI 7 zu SRI 8 auf. Der Geltungsbereich des SRI 8 schließt mit dem Erhöhungsfaktorwert von 1,20, über den der untere Niederschlagshöhengrenzwert berechnet wird, nicht direkt an den Ankerwert von 1,00 von SRI 7 an. Der aktuellen Methodik nach, wird ein Niederschlagswert einer bestimmten Dauerstufe immer dem nächst höheren SRI zugeordnet, wenn er höher ist, als die für den SRI definierte Niederschlagshöhe. Ist ein Niederschlagswert höher als der dem SRI 7 zugeordneten Wert, würde dieser eigentlich SRI 8 zugeordnet werden. Da der Geltungsbereich des SRI 8 jedoch über eine Untergrenze definiert wird, wäre dies nur korrekt, solang der Niederschlagswert höher wäre als dieser.

In Abbildung 5.1 sind die Niederschlagshöhen der SRI-Matrix des Rasters 87028 für jede Dauerstufe in einer Grafik dargestellt. Auf der X-Achse sind die SRI aufgetragen, und der Hintergrund der Grafik wurde entsprechend der Farbzuordnung eingefärbt. Bis SRI 7 steigen die Niederschlagshöhen bis auf kleinere Unebenheiten nahezu linear an. Ab SRI 7 steigen die Niederschlagshöhen der Dauerstufen deutlich schneller, wodurch eine leicht konkave Form entsteht. Auffällig ist, dass den SRI 2 und 4 deutlich weitere Bereiche zugeordnet werden als den anderen SRI < 7 (Abb. 5.2).

							Starkre	genindex S	RI für das KO	Starkregenindex SRI für das KOSTRA Raster 87028	7028								
Wiederkehrzeit T _n [a]	1	2	3	5	10	20	25	30	20	100					> 100				
Kategorie		Starkregen	ueße.			intensiverS	Starkregen		außergewöhnli	außergewöhnlicher Starkregen				extr	extremer Starkregen	_			
Starkregenindex SRI [-]	1	1	2	2	3	4	4	5	9	7	3	8	6		10		11		12
Erhöhungsfaktor [-]										1,00	1,20	1,39	1,40	1,59	1,60 -	2,19	2,20 -	2,79	≥ 2,80
Dauerstufe D									Nieder	Niederschlagshöhe h _N [mm]	lmn]								
5 min	5,7	8'4	6	10,5	12,6	14,7	15,3	15,9	17,4	19,5	23,4	27,1	27,3	31	31,2	42,7	42,9	54,4	54,6
10 min	6	11,7	13,4	15,4	18,2	21	21,9	22,7	24,7	27,5	88	38,2	38,5	43,7	44	60,2	60,5	76,7	77
15 min	11,1	14,4	16,3	18,8	22,1	25,4	26,5	27,3	29,8	33,1	2'68	46	46,3	52,6	53	72,5	72,8	92,3	92,7
20 min	12,6	16,3	18,5	21,3	25	28,8	56,62	31	33,7	37,4	6'44	52	52,4	265	8'65	81,9	82,3	104,3	104,7
30 min	14,6	19	21,6	24,9	29,3	33,8	35,2	36,4	9'68	44,1	25,9	61,3	61,7	70,1	9'02	9'96	26	123	123,5
45 min	16,3	21,6	24,6	28,5	33,8	39	40,8	42,1	46	51,3	61,6	71,3	71,8	81,6	82,1	112,3	112,9	143,1	143,6
60 min	17,3	23,2	26,7	31,1	37	43	44,9	46,5	6'05	56,8	68,2	79	79,5	6'06	6'06	124,4	125	158,5	159
90 min	18,9	25,2	28,9	33,5	39,8	46,1	48	49,7	54,3	60,6	72,7	84,2	84,8	96,4	26	132,7	133,3	169,1	169,7
2 h	20,2	26,7	30,5	35,3	41,8	48,4	50,5	52,2	57	63,5	76,2	88,3	6′88	101	101,6	139,1	139,7	177,2	177,8
3 h	22,1	58	33	38,1	45	51,8	54	55,8	6'09	67,8	81,4	94,2	94,9	107,8	108,5	148,5	149,2	189,2	189,8
4 h	23,6	30,7	34,9	40,2	47,3	54,4	26,7	9'85	6'89	71	85,2	7'86	99,4	112,9	113,6	155,5	156,2	198,1	198,8
6 h	25,9	33,4	37,8	43,3	50,9	58,4	8'09	62,8	68,3	75,9	91,1	105,5	106,3	120,7	121,4	166,2	167	211,8	212,5
9 h	28,3	86,3	40,9	46,8	54,7	62,6	65,2	67,3	73,1	81,1	6,79	112,7	113,5	128,9	129,8	177,6	178,4	226,3	227,1
12 h	30,2	38,5	43,3	49,4	57,6	65,8	68,5	70,7	76,7	85	102	118,1	119	135,2	136	186,2	187	237,2	238
18 h	33,1	41,8	46,9	53,3	62	7,07	73,5	75,8	82,2	90,9	1,601	126,4	127,3	144,5	145,4	199,1	200	253,6	254,5
1 d	35,3	44,3	49,6	56,3	65,3	74,3	77,2	9'62	86,3	95,3	114,4	132,5	133,4	151,5	152,5	208,7	209,7	265,9	266,8
2 d	44,6	54,4	60,2	67,4	77,2	87,1	90,2	95,8	100,1	109,9	131,9	152,8	153,9	174,7	175,8	240,7	241,8	9'908	307,7
3 d	51,1	61,4	67,4	75	85,3	9'26	6'86	101,6	109,2	119,5	143,4	166,1	167,3	190	191,2	261,7	262,9	333,4	334,6

SRI-Matrix des KOSTRA-Rasters 87028 entsprechend der Methodik nach Schmitt et al. (2018)

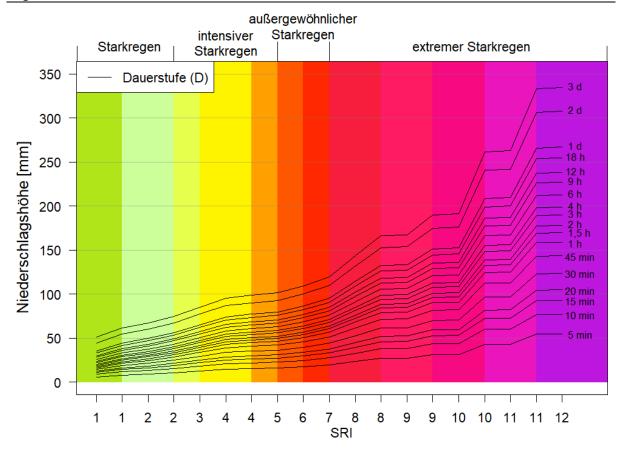


Abbildung 5.2 Grafik der Niederschlagshöhen aller Dauerstufen der SRI-Matrix des KOSTRA-Rasters 87028

5.1.2 Ereignisbezogener SRI

In Abbildungen 5.3 und 5.5 (oben) sind für die Ereignisse 2016 und 2018 die in den jeweiligen Dauerstufen erreichten SRI dargestellt. Da die Mehrheit der Szenarienmodellierungen mit aus zwei Nd.-Stationen gebildeten Gebietsniederschlägen durchgeführt wurde, erfolgte die Zuordnung der SRI auch für die Gebietsniederschläge (Abb. 5.4 und Abb. 5.5, unten).

Während des Ereignisses am 24. – 25. Juni 2016 wurden an S11 die höchsten SRI von 8 für die Dauerstufen D=15 und 30 min erreicht. Die zweithöchsten SRI von 7 wurden für S12 in den Dauerstufen D=10, 15 und 20 min ermittelt. S9 und S10 verzeichneten ebenfalls ein SRI von 7, jedoch für D=45 min. Dies entspricht Wiederkehrzeiten von $T_n \geq 100$ a. An S11 fällt der aufgezeichnete Niederschlag demnach in die Kategorie "extremer Starkregen". An S12, S10 und S9 wird die Kategorie "außergewöhnlicher Starkregen" erreicht. Die Stationen S6 und S8 überschritten einen SRI von 4 nicht, was der Kategorie "intensiver Starkregen" entspricht. S1 bis S5 und S7 blieben dauerhaft, bis auf S7 bei D=45 min, bei einem SRI von 1. Damit fallen diese in die Kategorie "Starkregen" (vergl. Abb. 5.3).

Die für die Szenarienmodellierung gebildeten Gebietsniederschläge des EZGs ACH (S7 & S11 gew. Mittel) und des EZGs NO (S5 & S7 gew. Mittel) sind mit den Stationen, aus denen sie gebildet wurden in Abbildung 5.5 dargestellt. Der für EZG NO ermittelte Niederschlag blieb dauerhaft auf einem

SRI von 1. Der für EZG ACH gebildete Gebietsniederschlag erreichte einen maximalen SRI von 4 in den Dauerstufen D = 15 bis 90 min. Damit liegt er um 4 SRI unter dem maximalen SRI von S11 und um 2 SRI über dem maximalen SRI von S7.

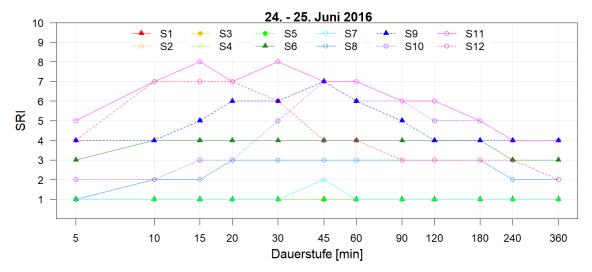


Abbildung 5.3 Für Ereignis 2016 für jede Dauerstufe ermittelte SRI aller 12 Nd.-Stationen

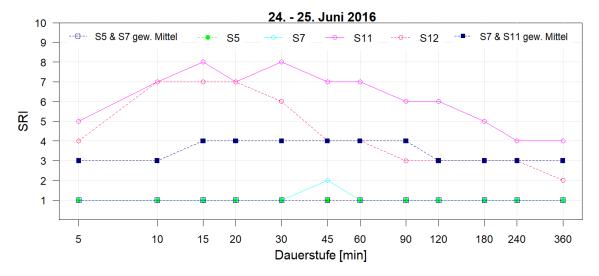


Abbildung 5.4 Für Ereignis 2016 und jede Dauerstufe ermittelte SRI der für die Szenarienmodellierung gebildeten Gebietsniederschläge und der dafür verwendeten Nd.-Stationen

Das Ereignis am 11. Juni 2018 (Abb. 5.5, oben) erreichte einen SRI von 6 und fällt damit maximal in die Kategorie "außergewöhnlicher Starkregen". Zugeschrieben wird dies S11 für die Dauerstufen D = 30 und 45 min. In den kürzeren Dauerstufen von D = 5 bis 20 min wurden für S11 nur SRI von unter 3 erreicht. Insgesamt verzeichnete keine der 12 Nd.-Stationen für die Dauerstufen D = 5 bis 20 min Niederschlagssummen, die einem SRI größer 3 zugeordnet werden würden. In den Dauerstufen von D > 20 min wurden, abgesehen von S11, keine SRI größer 4 erreicht. Somit wird der an diesen Nd.-Stationen erfasste Niederschlag, in die Kategorien "Starkregen" und "intensiver Starkregen" eingeordnet.

Die Gebietsniederschläge für EZG ACH und EZG NO erreichten beide maximale SRI von 4. Für den Gebietsniederschlag des EZGs ACHs wurden diese in den Dauerstufen D = 30 bis 60 min erreicht und für den Gebietsniederschlag des EZGs NO in den Dauerstufen D = 45 bis 60 min. Damit liegt der Gebietsniederschlag für EZG ACH um 2 SRI unter dem der Einzelstation S11. Die SRI des Gebietsniederschlags von EZG NO stimmt mit denen der Station 7 überein.

In einem zusammenfassenden Vergleich der Ereignisse kann festgehalten werden, dass im Jahr 2016 die höchsten SRI für kurze Dauerstufen bis 30 min erreicht wurden und im Jahr 2018 für Dauerstufen ab 30 min. Aus den gezeigten Grafiken kann nicht abgeleitet werden, zu welchem Zeitpunkt im Niederschlagsereignissverlauf das Dauerstufenintervall auftrat, das den höchsten SRI erreicht hat.

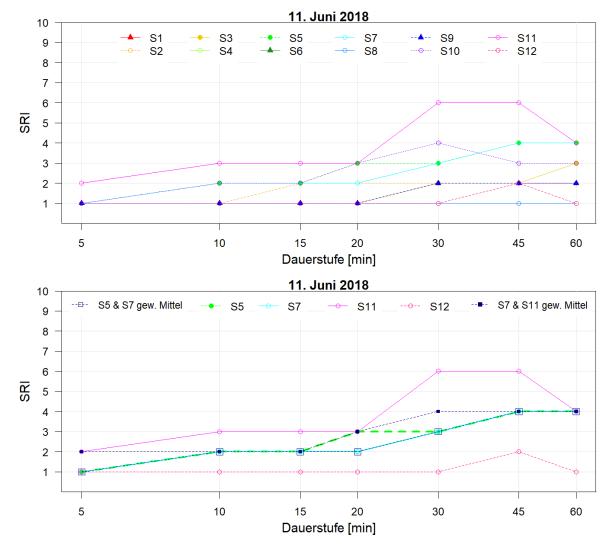


Abbildung 5.5 Oben: Für Ereignis 2018 für jede Dauerstufe ermittelte SRI aller 12 Nd.-Stationen Unten: Für Ereignis 2018 und jede Dauerstufe ermittelte SRI der für die Szenarienmodellierung gebildeten Gebietsniederschläge und der dafür verwendeten Nd.-Stationen.

T2 Ergebnisse

5.2 Hydrologische und hydraulische Modellierung mit RoGeR

Die Dauer einer Szenarienmodellierungen mit RoGeR betrug je nach EZG-Größe und Niederschlagszeitreihenlänge bis zu 45 h. Die hier ausgewerteten Modellierungsergebnisse sind maximal über das jeweilige modellierte Szenario aufgetretene ÜT und FG aller EZG. In allen EZG wird deutlich, dass unabhängig des betrachteten Niederschlagsereignisses, hohe ÜT und FG, in vielen Fällen an den gleichen Orten im EZG auftraten. Dies kann in Abbildungen 5.6 und 5.7 nachvollzogen werden. Sie zeigen beispielhaft die räumlich differenzierten ÜT- und FG-Ergebnis-Rasterdateien des EZGs ACH für Ereignis 2016 und Szenario Nd. S11. Abbildung 5.6 lässt für das EZG charakteristische Fließwege entlang von langen, geraden Straßen erkennen, die mit dem Gefälle des südöstlichen Teils des EZGs von Südost nach Nordwest verlaufen.

Die für ein Szenario beispielhaft dargestellten Abbildungen 5.6 und 5.7 zeigen somit die Rasterdatensätze, die die Informationen enthalten, welche zur weiteren Auswertung der Modellierungsergebnisse herangezogen wurden. In den ersten Kapiteln werden die ÜT- und FG-Ergebnisse getrennt voneinander betrachtet, um diese im letzten Teil zusammenzuführen und auch die darüber abgeleiteten Ergebnisse der Gefahrenklassen-Zuweisung auszuführen.

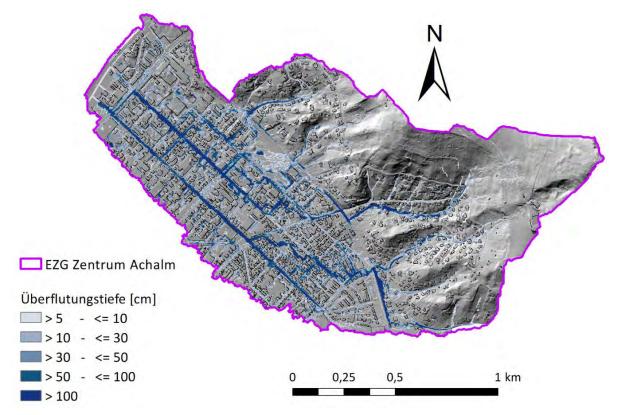


Abbildung 5.6 Räumlich differenzierte Darstellung der über das Ereignis 2016 hinweg maximal aufgetretenen Überflutungstiefen in EZG ACH für die aus Station 11 gebildeten Gebietsniederschlagsbelastung

Eine Validierung der modellierten ÜT und FG konnte nicht durchgeführt werden, da die verfügbaren Informationen nicht ausreichten. Die dokumentierten Feuerwehreinsätze wurden nur mit "Wasser" betitelt und nicht weiter differenziert. Somit war die Unterscheidung der Einsatzursache zwischen Flusshochwasser, wild abfließendem Wasser, Wasser außerhalb oder innerhalb eines Gebäudes oder Überflutung infolge von Überstau der Kanalisation nicht möglich. Bildmaterial, das eventuell eine Ableitung von Wasserständen ermöglicht hätte, waren nicht vorhanden. Außerdem enthielten die Angaben zum Ereignis des 11. Juni 2018 keine Zeitdokumentation. Im Rahmen der Umfrage auf Social Media meldeten sich einige Personen, die während eines der Ereignisse mit dem Smartphone Fotos oder Videos gemacht hatten. Obwohl explizit um Material von in den Straßen stehendem Wasser, unabhängig von Fließgewässern, gebeten wurde, waren die meisten zugesandten Bilder von Fließgewässern wie der Echaz.

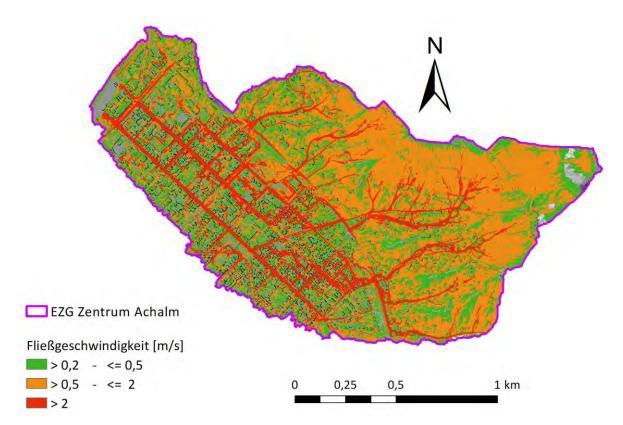


Abbildung 5.7 Räumlich differenzierte Darstellung der über das Ereignis 2016 hinweg maximal aufgetretenen Überflutungstiefen in EZG ACH für die aus Station 11 gebildete Gebietsniederschlagsbelastung

5.2.1 Getrennte Auswertung: Überflutungstiefen und Fließgeschwindigkeiten

Überflutungstiefen (ÜT)

Abbildung 5.8 zeigt Säulendiagramme, der maximal auf versiegelten Flächen aufgetretenen ÜT für verschiedene Niederschlagsszenarien in allen drei EZG. Die linke Hälfte von Abbildung 5.8 zeigt die insgesamt 4 Säulendiagramme des Ereignisses am 24.06.2016 für jedes Szenario. Die rechte Hälfte zeigt die insgesamt 3 Säulendiagramme des Ereignisses am 11.06.2018 für jedes Szenario. Der fürs Szenario angewandte Gebietsniederschlag ist unterhalb der Säulendiagramme in horizontaler Richtung benannt. Auf der Y-Achse ist der prozentuale Anteil der gesamten versiegelten EZG-Fläche aufgetragen, der durch die entlang der X-Achse aufgetragene entsprechende Wasserhöhe überflutet ist. Die Wasserhöhen unterhalb von 5 cm, die einen großen prozentualen Anteil ausmachen, sind nicht dargestellt.

Vergleicht man für beide Ereignisse die EZG innerhalb des gleichen Szenarios miteinander, fällt auf, dass das EZG ACH im Schnitt die höchsten ÜT ausbildete. Dabei sind die Unterschiede zwischen EZG ACH und NO jedoch recht gering. Bei Betrachtung des gleichen Szenarios ist besonders auffällig, dass die ÜT-Klassen im EZG ACH im gleichen Verhältnis zueinanderstehen, wie die ÜT-Klassen im EZG NO. Das EZG GOE weicht hingegen von den anderen EZG ab. Dort bildeten sich auf deutlich weniger Rasterzellen ÜT von > 5 cm. Für das Ereignis 2016 bildete Szenario Nd. S11 in allen EZG die höchsten ÜT aus. Darauf folgen in absteigender Reihenfolge Szenario Nd. GOE, Nd. ACH und mit den niedrigsten ÜT Nd. NO. Für Ereignis 2018 bildete Szenario Nd. ACH die höchsten ÜT aus. Gefolgt von Nd. NO und Nd. GOE.

Die über alle Szenarien und beide Ereignisse hinweg in EZG ACH und NO am häufigsten aufgetretenen ÜT liegen zwischen 10 und 30 cm. Abgesehen von Szenario Nd. NO in EZG NO, in dem ÜT von 5 bis 10 cm flächenmäßig dominieren. In EZG GOE dominieren ÜT von 5 bis 10 cm für jedes Szenario. Szenario Nd. NO 2016 und Szenario Nd. GOE 2018 führten in jedem EZG zu sehr ähnlichen ÜT-Verteilungen, wobei Nd. GOE 2018 in EZG ACH und NO zu minimal höheren ÜT führte als Nd. NO 2016. ÜT von > 1 m traten in allen EZG für alle Szenarien am seltensten auf, außer in EZG GOE für Szenario Nd. S11, wo ÜT von > 50 bis ≤ 100 cm am wenigsten vorkamen.

Obwohl 2016 von den Szenarien Nd. ACH und Nd. GOE mit Ereignissummen von 43,1 mm und 43,5 mm nahezu identische Niederschlagsbelastungen ausgingen (Tab. 4.9), führte Nd. GOE in allen EZG zu höheren ÜT. Szenario Nd. NO 2018 fällt mit einer Ereignissumme von 43,7 mm in den gleichen Belastungsbereich wie die eben benannten Szenarien aus dem Jahr 2016, bildete aber in allen EZG deutlich geringere ÜT aus. Szenario Nd. ACH 2018 lag mit 45,6 mm um ca. 2 mm über den Szenarien Nd. ACH und Nd. GOE aus dem Jahr 2016, äußerte sich jedoch in allen EZG mit niedrigeren ÜT. Die Ereignissummen der Szenarien Nd. NO 2016 und Nd. GOE 2018 lagen mit 24,2 und 25,3 um ca. 1 mm auseinander. Wie entsprechend der höheren Niederschlagsmenge zu erwarten war, führte Nd. GOE 2018 zu höheren ÜT.

Fließgeschwindigkeiten (FG)

Abbildung 5.9 ist vom strukturellen Aufbau gleich wie Abbildung 5.8. Anstelle der ÜT zeigen die Säulendiagramme in Abbildung 5.9 jedoch die über das gesamte Ereignis hinweg aufgetretenen maximalen FG. EZG ACH bildete im direkten Vergleich der EZG innerhalb des gleichen Szenarios beider Ereignisse die höchsten FG aus. In der Häufigkeitsverteilung der FG-Klassen gleichen sich anders als für die ÜT, EZG ACH und EZG GOE. EZG NO weist eine andere Struktur auf. 2016 ergaben sich in jedem EZG die höchsten FG für Szenario Nd. S11, gefolgt von Nd. GOE, Nd. ACH und Nd. NO. 2018 verzeichnete Szenario Nd. ACH, vor Nd. NO und Nd. GOE die höchsten FG in jedem EZG.

In EZG NO dominieren für jedes Ereignis und jedes Szenario FG zwischen > 0.2 und \leq 0.5 m/s. In EZG ACH und EZG GOE dominieren 2016 FG zwischen > 0.5 und \leq 2 m/s, ausgenommen des Szenarios Nd. NO. Hier ergaben sich häufiger FG von > 0.2 bis \leq 0.5 m/s als > 0.5 bis \leq 2 m/s. 2018 ergaben sich hauptsächlich FG von > 0.2 bis \leq 0.5 m/s. Die einzige Ausnahme stellt EZG ACH für Szenario Nd. ACH dar, das minimal häufiger FG von > 0.5 bis \leq 2 m/s ausbildete.

Nd. NO 2016 und Nd. GOE 2018 äußerten sich auch in der Ausbildung der FG in allen EZG sehr ähnlich. Die Szenarien Nd. ACH 2016, Nd. GOE 2016 und Nd. ACH 2018, die sich wie schon zuvor genannt wurde, in den Ereignissummen stark ähneln, bildeten innerhalb des gleichen EZGs unterschiedliche FG-Häufigkeiten aus.

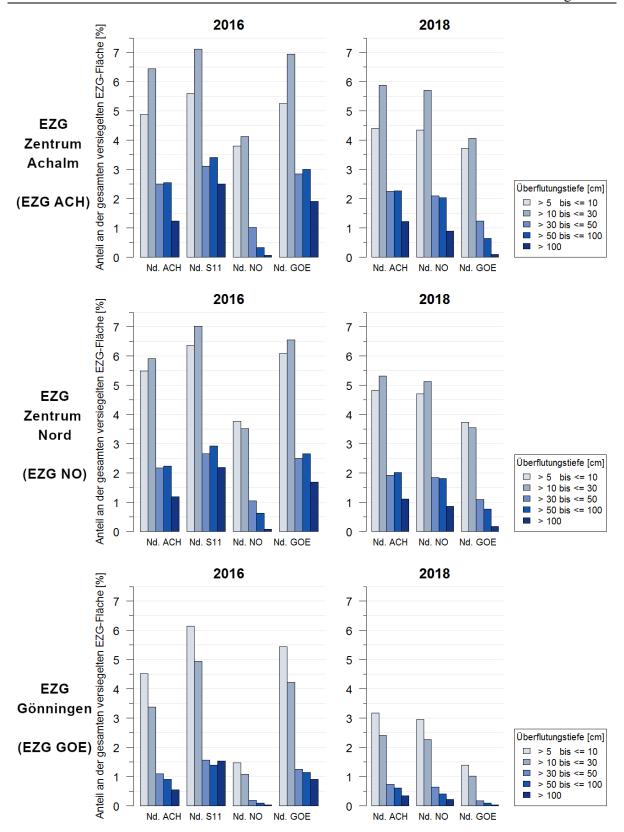


Abbildung 5.8 Säulendiagramme der ÜT aller Szenarien der Ereignisse 2016 und 2018

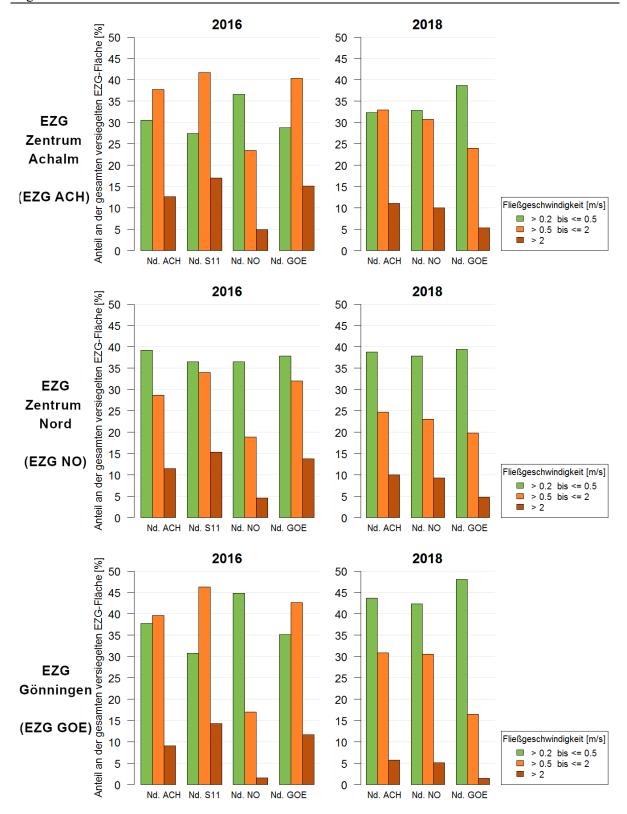


Abbildung 5.9 Säulendiagramme der FG aller Szenarien der Ereignisse 2016 und 2018

5.2.2 Kombinierte Auswertung: Überflutungstiefe und Fließgeschwindigkeit

Abbildungen 5.10 und 5.11 zeigen die für die verschiedenen modellierten Niederschlagsszenarien der Ereignisse 2016 und 2018 ermittelten ÜT und FG, in einer Matrix kombiniert. In Analogie zu Abbildungen 5.8 und 5.9 sind die EZG in horizontaler Richtung aufgetragen und die verschiedenen Niederschlagsszenarien in vertikaler Richtung. Die Szenarienmodellierungen, die mit dem Gebietsniederschlag durchgeführt wurden, der über die Thiessen-Polygone für das entsprechende EZG ermittelt wurde (Nd. ACH, Nd. NO und Nd. GOE), sind dick schwarz umrandet.

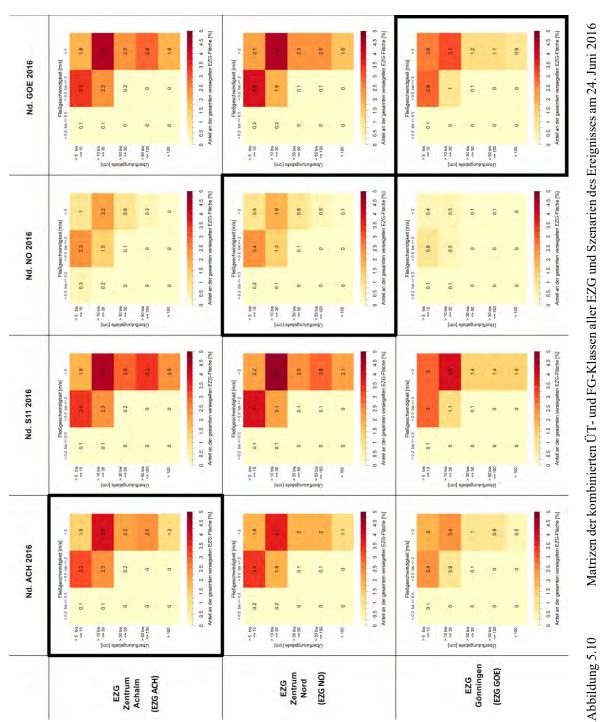
Jede Matrix setzt sich aus 15 Zellen zusammen, die entsprechende Kombinationen aus ÜT- und FG-Klassen repräsentieren. Sie enthalten Prozentwerte, die sich auf den Anteil der Rasterzellen im versiegelten EZG beziehen, die über den gesamten modellierten Szenarienzeitraum die entsprechende Kombination aus ÜT und FG aufwiesen. Die Matrix-Zellen wurden entsprechend des prozentualen Anteils von hellgelb bis dunkelrot eingefärbt.

Kombinationen aller ÜT-Klassen mit FG zwischen > 0,2 und $\le 0,5$ m/s machen in allen Matrizen von 2016 und 2018 einen verschwindend geringen Anteil aus. Das gleiche gilt für die Kombination aus ÜT > 30 cm und FG von > 0,5 bis ≤ 2 m/s. Wie schon aus Abbildungen 5.8 und 5.9 ersichtlich war, zeigt Abbildung 5.10, dass alle EZG am stärksten auf Szenario Nd. S11 reagierten.

Für das Ereignis 2016 stellte die Kombination aus ÜT von > 10 bis \leq 30 cm und FG von > 2 m/s die in 8 von 12 Matrizen am häufigsten aufgetretene ÜT&FG-Kombination dar. Ausnahmen stellen das Szenario Nd. ACH in EZG GOE dar mit gleichen Häufigkeiten für ÜT > 5 bis \leq 10 cm und FG > 0,5 bis \leq 2 m/s und ÜT von > 10 bis \leq 30 cm und FG von > 2 m/s, wie auch die Matrizen des Szenarios Nd. NO mit der dominierenden Kombination von ÜT > 5 bis \leq 10 cm und FG > 0,5 bis 2 m/s. Für das Ereignis 2018 war die Kombination aus ÜT von > 10 bis \leq 30 cm und FG von > 2 m/s nur in 4 von 9 Matrizen die dominierende. Alle EZG reagierten auf Szenario Nd. GOE am häufigsten mit der ÜT&FG-Kombination von > 5 bis \leq 10 cm und > 0,5 bis \leq 2 m/s. Auch in EZG GOE überwog die ÜT&FG-Kombination von > 5 bis \leq 10 cm und > 0,5 bis \leq 2 m/s für jedes Szenario.

In Abbildung 5.12 sind die Säulendiagramme der ÜT und FG (Abb. 5.8 und 5.9) und die Matrizen (Abb. 5.10 und 5.11) in einer Grafik kombiniert dargestellt. Dies soll den Vergleich der EZG-Reaktionen erleichtern und die Zusammenhänge besser darstellen. Wie Abbildung 5.8 zeigt, unterscheiden sich EZG ACH und NO in der Ausbildung der ÜT innerhalb der Szenarien für 2016 nur wenig. In der Ausbildung der FG weist EZG NO jedoch geringere Werte auf (Abb. 5.9). Dies spiegelt sich auch in den Matrizen wider. In EZG NO weisen die Matrix-Zellen der ÜT-Klasse > 5 bis \leq 10 cm, unabhängig der FG-Klasse, fast ausschließlich höhere Werte auf als in EZG ACH. Die Kombination aus ÜT > 30 cm und FG > 2 m/s trat fast ausschließlich in EZG ACH häufiger auf. Eine geringe Abweichung stellt Szenario Nd. S11 dar. Hier bildeten sich ÜT&FG-Kombinationen von > 10 bis \leq 30 cm und > 2 m/s, öfter in EZG NO aus.

Die Ähnlichkeit der Auswirkungen der Szenarien Nd. NO 2016 und Nd. GOE 2018 in allen EZG werden durch die entsprechenden Matrizen in Abbildungen 5.10 und 5.11 bestätigt. Dabei wirkte sich Nd. GOE 2018 etwas stärker auf die EZG ACH und NO aus, als Nd. NO 2016. In EZG GOE äußerte sich hingegen Nd. NO 2016 deutlicher.



Matrizen der kombinierten ÜT- und FG-Klassen aller EZG und Szenarien des Ereignisses am 24. Juni 2016

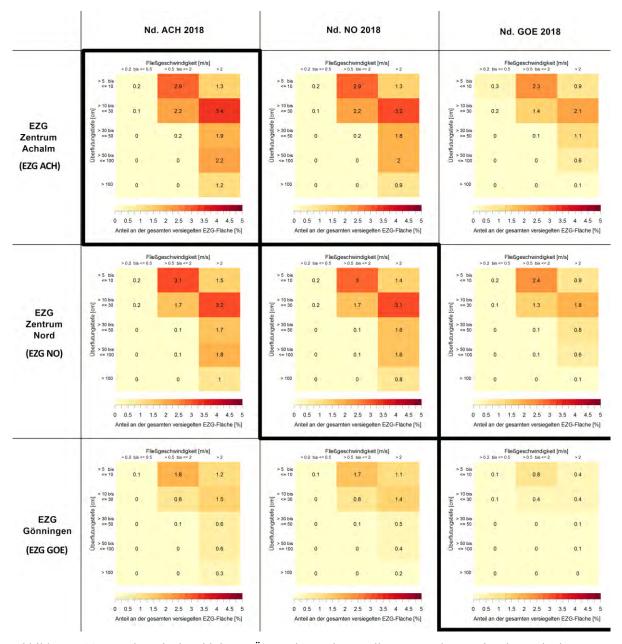
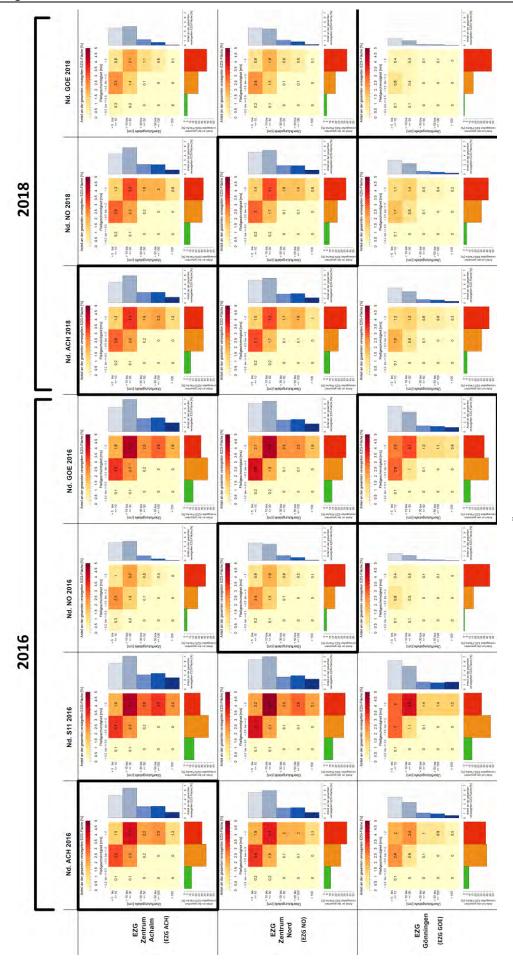


Abbildung 5.11 Matrizen der kombinierten ÜT- und FG-Klassen aller EZG und Szenarien des Ereignisses am 11. Juni 2018



Kombinierte Abbildung der Matrizen der kombinierten ÜT- und FG-Klassen aller EZG und aller Szenarien der Ereignisse 2016 und 2018 (Abb. 5.8 und 5.9) in Kombination mit den Abbildungen der Säulendiagrammen der ÜT und FG (Abb. 5.10 und 5.11) Abbildung 5.12

5.2.3 Gefahrenklassen

Abbildung 5.13 zeigt beispielhaft an der Matrix des EZGs ACH und Szenario Nd. S11 2016 aus Abbildung 5.12, welcher Matrix-Zelle welche Gefahrenklasse zugeordnet wurde (vergl. Abb. 4.28). Die Gefahrenklassenzuordnung ist demnach unabhängig vom modellierten EZG und Szenario und erfolgte für alle weiteren Matrizen entsprechend des gleichen Prinzips.

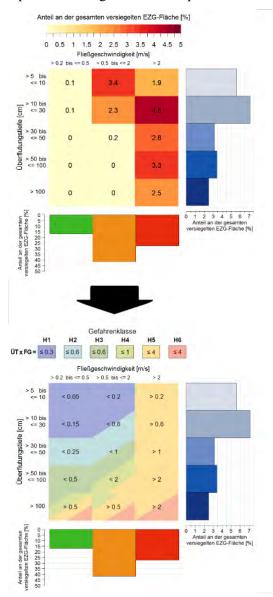


Abbildung 5.13 Übertragung der Gefahrenklassen auf die aus kombinierten ÜT und FG erstellten Matrizen

Die in den Zellen der unteren Matrix eingetragenen Zahlenwerte kennzeichnen das Produkt aus den für die jeweilige Zelle geltenden Obergrenzen der ÜT- und FG-Klassen. Die ÜT- und FG-Produkte waren für die Zuordnung der Gefahrenklassen von Relevanz. Entsprechend konnten nur 8 der insgesamt 15 kombinierten ÜT- und FG-Klassen eindeutig einer Gefahrenklasse von H1 bis H6 zugeordnet werden. 7 der 15 ÜT- und FG-Klassen erstreckten sich über zwei bis vier Gefahrenklassen und wurden entsprechend farblich gekennzeichnet. Die Gefahrenklasse H6 kommt ausschließlich in Kombination mit anderen Gefahrenklassen vor. Dies ergibt sich daraus, dass die Gefahrenklassen und die

Klasseneinteilung der ÜT und FG mittels anderer Grenzwerte definiert wurden. Auffällig ist, dass alles oberhalb einer FG von 2 m/s, unabhängig von der ÜT, der Gefahrenklasse H5 und höher zugeordnet wurde. Für das in Abbildung 5.13 dargestellte Beispiel ergaben sich somit am häufigsten ÜT- und FG-Kombinationen, die der Gefahrenklasse H5 entsprechen.

5.3 Verknüpfung der Ergebnisse: SRI und Modellierung

Nach der gesonderten Betrachtung der Ergebnisse zum SRI und zur Oberflächenabflussmodellierung, sollen diese nun in einen Kontext gesetzt werden. Szenarien mit geringeren SRI führten innerhalb des gleichen EZGs und des gleichen Ereignisjahrs zu geringeren ÜT und FG (Tab. 5.1). Im Jahr 2016 äußerte sich das Szenario mit dem höchsten SRI (Nd. ACH), unter Betrachtung des gleichen EZGs, durch Ausbildung der höchsten ÜT und FG.

Im Jahr 2018 wurden die Szenarien Nd. ACH und Nd. NO dem gleichen SRI zugeschrieben, wobei die Ereignissumme des Szenarios Nd. ACH um ca. 2 mm höher war, als die des Szenarios Nd. NO. Dies äußerte sich in der Ausbildung höherer ÜT und FG (Tab. 5.1). Im Vergleich aller Szenarien mit SRI 4 aus beiden Ereignisjahren wurden durch Nd. ACH 2016 in jedem EZG höhere ÜT und FG gebildet, als durch die anderen zwei Szenarien. Dabei führte Szenario Nd. ACH 2016 in den EZG ACH und GOE im Vergleich zu den anderen SRI-4-Szenarien zu deutlich höheren FG. In EZG NO hingegen äußerten sich die verschiedenen SRI-4-Szenarien in kaum unterschiedlichen FG-Verteilungen. Die Ereignissummen der Szenarien unterschieden sich zwar nur geringfügig, jedoch fällt mit Blick auf Abbildungen 5.4 und 5.5 (unten) auf, dass die maximalen SRI von 4 in unterschiedlichen Dauerstufen erreicht wurden. Dabei lassen sich für die Szenarien im Ereignisjahr 2018, im Vergleich zu Nd. ACH 2016, über die gesamte Ereignisdauer hinweg ein gleichmäßigerer Intensitätsverlauf und zwei "peaks" erkennen (Abb. 4.27).

Die Szenarien Nd. ACH 2016 und Nd. GOE 2016 unterscheiden sich zwar in ihren Ereignissummen nicht, jedoch deutlich in ihren SRI von 4 und 7. Dabei zeigten beide Szenarien einen ähnlichen Intensitätsverlauf mit einem "peak", wobei sich Nd. GOE im Vergleich zu Nd. ACH durch etwas höhere Intensitäten über eine kürzere Dauer auszeichnete (Abb. 4.26). Dies spiegelt sich im Abfall der SRI für steigende Dauerstufen wider (Abb. 5.4). Auch hier resultierte das Szenario mit dem höchsten SRI, innerhalb des gleichen EZGs, in höheren ÜT und FG. Wird Szenario Nd. NO 2018 mit SRI 4 aufgrund der nahezu identischen Ereignissumme in den Vergleich mit aufgenommen, bietet dies, mit nochmals geringeren ÜT und FG, ein weiteres abweichendes Ergebnis der Abflussbildung.

Tabelle 5.1 Zusammer	nfassung der	maximalen	SRI der mo	dellierten S	zenarien und	d der Ereigni	ssummen
Ereignisjahr		20	16			2018	
Szenario	Nd. ACH	Nd. S11	Nd. NO	Nd. GOE	Nd. ACH	Nd. NO	Nd. GOE
max. SRI	4	8	1	7	4	4	2
in Dauerstufe(n) [min] D =	15 – 60	15, 30	-	10 - 20	30 - 60	45 - 60	45
Ereignissumme	43,1	54,8	24,2	43,5	45,6	43,7	25,3
Ereignisdauer	1:17	1:17	0:56	0:58	1:05	1:05	0:53

Weiterhin auffällig ist, dass das Szenario Nd. S11 2016 mit einem SRI von 8 in EZG GOE zu niedrigeren ÜT führte, als Szenario Nd. ACH 2016 mit einem SRI von 4 in EZG NO. Höhere FG wurden hingegen in EZG GOE gebildet. Einen ähnlichen Vergleich bieten Szenario Nd. NO 2016 mit einem SRI von 1 in EZG NO und Szenario Nd. NO 2018 mit SRI 4 in EZG GOE. Letzteres resultierte trotz des höheren SRI in niedrigeren ÜT, jedoch höheren FG.

Zusammengefasst lassen sich für unterschiedliche Szenarien innerhalb des gleichen EZGs folgende gegensätzliche Ergebnisaussagen formulieren:

Ergebnisaussage 1: Höherer SRI = Höhere ÜT

(Für Szenarien Nd. ACH 2016 und Nd. GOE 2016: Höherer SRI weist bei gleicher Ereignissumme, ähnlichem qualitativen Intensitätsverlauf und kürzerer Niederschlagsdauer auf höhere Überflutung hin)

Ergebnisaussage 2: Gleicher SRI ≠ Gleiche ÜT

(Für Szenarien Nd. ACH 2016, Nd. ACH 2018 und Nd. NO 2018: Gleicher SRI lässt bei nahezu identischer Ereignissumme, unterschiedlichem qualitativen Intensitätsverlauf und leicht abweichender Ereignisdauern keine Aussage über Überflutungstiefen zu)

Anhand der auf die Matrizen aus Abbildung 5.12 übertragenen Gefahrenklassen lassen sich Aussagen über die durchschnittliche Gefahrenlage während der verschiedenen Ereignisse treffen. Wie in Kapitel 5.2.2 genannt, dominierten für Ereignis 2016 in den meisten Matrizen die ÜT- & FG-Kombination von > 10 bis ≤ 30 cm und > 2 m/s (Abb. 5.14, links, schwarz umrandet). Dies entspricht der Gefahrenklasse H5. Die am zweithäufigsten vertretene ÜT- & FG-Kombination stellten ÜT von > 5 bis ≤ 10 cm und FG von > 0,5 bis ≤ 2 m/s dar, was der Gefahrenklasse von H1 entspricht (Abb. 5.14, links, schwarz gestrichelt umrandet). Im Jahr 2018 überwiegt hingegen Gefahrenklasse H1 vor H5 (Abb. 5.14, rechts).

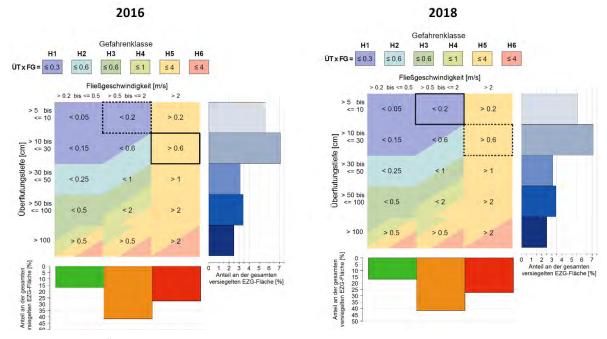


Abbildung 5.14 Übertragung der Gefahrenklassen auf die Ereignisse 2016 und 2018

6 Diskussion

Die folgende Diskussion der Ergebnisse soll entsprechend der Zielsetzung der Beantwortung der Frage nach einem zwischen SRI und Überflutungsgefahr bestehenden Zusammenhang aufgebaut werden. Da mit dem – einem Niederschlagsereignis zugeordneten – SRI die Information über die von dem Ereignis ausgehende Überflutungsgefahr transportiert werden soll, muss die Kategorisierung der Niederschlagsereignisse auf einer einheitlichen Methodik mit wenig Interpretationsspielraum basieren. Auf die Evaluierung der SRI-Zuordnung folgt die Prüfung der mit RoGeR modellierten Überflutungsgefahr, um anschließend die Komponenten zusammenzuführen und eine Aussage treffen zu können. Dabei sollen die Unsicherheiten diskutiert werden, mit dem Ziel, den Grad der möglichen Fehlermultiplikation einschätzen zu können.

6.1 SRI

6.1.1 SRI-Matrizen

Gegenstand des ersten Diskussionspunkts zum Thema des SRIs stellt der Aufbau der SRI-Matrizen dar. Die SRI von 1, 2 und 4 werden in den SRI-Matrizen über jeweils zwei, anstatt eine Spalte definiert. Da die Information der Wiederkehrzeiten bei der Anwendung des SRI ohnehin verloren geht, könnten Wiederkehrzeiten, die im gleichen SRI resultieren, einfachheitshalber zusammengefasst werden.

Wie in Kapitel 5.1.1 vermerkt, besteht zwischen den SRI 7 und 8 ein Wertebereich, der keine Zuordnung zu einem der SRI zulässt. Dies ist der Fall, wenn der einzuordnende Regenhöhenwert einer bestimmten Dauerstufe höher ist als der Wert, der SRI 7 zugeordnet ist und niedriger, als der untere Grenzwert des SRI 8. Darüber hinaus ist die Methodik der SRI-Zuordnung alleinig aus der Matrix ohne zusätzliche Erklärung nicht ersichtlich. Dementsprechend wäre eine einheitliche und eindeutige Grenzwertdefinition entweder über einen einzigen Wert, wie es für SRI 1 bis 7 der Fall ist, oder über zwei Werte, wie es für SRI 8 bis 12 definiert ist, förderlich. Einerseits soll dadurch kein Raum für Missverständnisse und Fehlzuordnungen gelassen werden, andererseits würde damit die Lücke zwischen SRI 7 und 8 geschlossen werden.

Die Abstufung und Zuordnung des Wertebereichs der SRI von 1 bis 7 erfolgte in Anlehnung an die Leistungsfähigkeit der Kanalisation, was in der SRI-Matrix in unregelmäßigen Abständen der Wiederkehrzeiten und somit der berechneten Regenhöhen der SRI-Grenzwerte resultiert (vergl. Abb. 5.2) (Schmitt, 2014). So werden beispielsweise die Wiederkehrzeiten für $T_n = 10$ a, 20 a, 25 a und 30 a berechnet, nicht aber für $T_n = 15$ a. Damit wird die Überflutungsgefahr in einen Zusammenhang mit der Leistungsfähigkeit der Kanalisation gebracht, was jedoch ganzheitlich betrachtet nicht der Fall ist. Die Kanalisation kann zwar zu einer durchschnittlichen Reduktion der Wassermassen im

betrachteten Gebiet beitragen, hat aber besonders ab der Niederschlagsbelastung eines außergewöhnlichen Starkregenereignisses keinen merklichen Einfluss mehr darauf. Hinzu kommt, dass sich ungünstige Strukturen und Senken im betrachteten Gebiet dem Einflussbereich der Kanalisation entziehen (LUBW, 2016).

Entsprechend Kapitel 2.1.1 existieren für Begriff den "Starkregen" verschiedene Definitionsmöglichkeiten. In den letzten Jahren fand er vermehrt in Verbindung mit kurzen, lokal begrenzten, konvektiven Niederschlagsereignissen mit hohen Niederschlagssummen Anwendung. Da auch Schmitt et al. (2018) den SRI bezüglich Starkregen entwickelten, und diese meist von geringer Dauer sind – der DWD definiert Regenhöhengrenzwerte bis zu einer Dauer von 6 h (Abb. 2.1) – wären die Dauerstufen > 6 h der SRI-Matrix keine Bewertungskriterien für Starkregenintensitäten. Eine Reduktion der Matrizen um die Dauerstufen D = 9 h, 12 h, 18 h, 1 d, 2 d und 3 d wäre für die Übersichtlichkeit förderlich.

Abgesehen vom strukturellen Aufbau der SRI-Matrizen, ergaben sich auch Fragen zur zugrundeliegenden Starkregenextremwertstatistik. Da diese die Grundlage für die SRI-Matrizen schafft und somit die Basis für die Zuordnung der SRI zu den Niederschlagsereignissen bildet, ist die Wahl der zugrundeliegenden Starkregenextremwertstatistik von elementarer Wichtigkeit. Je nach angewandter Methodik zur extremwertstatistischen Analyse, können Starkregenereignisse aufgrund unterschiedlicher Starkregenextremwertstatistiken unterschiedlichen SRI zugeordnet werden. Dabei sind besonders Niederschlagsintensitäten der kurzen Dauerstufen mit hohen Unsicherheiten behaftet. Stoelzle et al. (2016) sehen dies besonders für Gebiete, deren Abdeckung durch Niederschlagsmessstationen gering ist oder die große Höhenunterschiede aufweisen. Fischer und Schumann (2018) bemerkten, dass sich die, entsprechend der Methodik zur extremwertstatistischen Auswertung von Starkregenereignissen im Arbeitsblatt DWA-A 531 (DWA, 2012) hauptsächlich angewandte zweiparametrige Gumbel-Verteilung in den geringen Dauerstufen nicht zufriedenstellend anpassen lässt. Da KOSTRA an die gleiche Methodik anlehnt, würden Niederschlagmengen der kurzen Dauerstufen zu hohen SRI zugeordnet werden. In Hinsicht auf die Gefährdungsanalyse wird jedoch die Überschätzung der Gefahr gegenüber der Unterschätzung bevorzugt (DWA, 2016; Mudersbach, 2016).

Eine weitere, sich aus KOSTRA ergebende Problematik, betrifft die Regionalisierung und den Umgang damit, wenn das einzuordnende Ereignis in unterschiedliche KOSTRA-Raster fällt. Im Falle der SRI-Zuordnung von Punktmessungen wie in dieser Arbeit, ist die Zuordnung zu einem Raster meist eindeutig. Dennoch können Niederschlagsmessstationen nah an Grenzbereichen liegen, wie es bei Nd.-Station 12 der Fall war (Abb. 4.2.1). Wäre für die Szenarienmodellierung beispielsweise ein Gebietsniederschlag aus den Stationen 2 und 4 gebildet worden, hätte die SRI Zuordnung über zwei Raster erfolgen müssen. Dazu kommt, dass einem ganzheitlich betrachtetem Gebiet, wie hier der Verwaltungseinheit der Stadt Reutlingen, unterschiedliche Starkregenstatistiken zugeordnet werden.

Erfolgt die Kategorisierung des Starkregenereignisses, wie von Schmitt (2015) vorgeschlagen, über Radardaten unter Betrachtung mehrerer Zellen, wird diese Problematik nochmals zentraler.

Eine weitere Ursache für die Unsicherheit der SRI-Zuordnung ist die klimatisch bedingte Verschiebung der Niederschlagsspannweiten und somit der Veränderung der Starkregenextremwertstatistik, deren Methodik auf der Stationarität basiert. Zukünftige Klimaänderungen werden nicht abgedeckt, weshalb die SRI-Matrizen im Prinzip immer mit der aktuellsten Extremwertstatistik synchronisiert werden müssten (Nuswantoro et al., 2016).

6.1.2 Ereignisbezogener SRI

Zu der Unsicherheit der SRI-Zuordnungsbasis kommen weitere Unsicherheiten in der eindeutigen Klassifizierung einzelner Niederschlagsereignisse. Die betrachteten Starkregenereignisse der Jahre 2016 und 2018 wurden nicht in ihrer Gesamtheit mittels eines SRI klassifiziert. Es wurde zwar für jede der im Reutlinger Stadtgebiet installierten Nd.-Stationen ein maximaler SRI ermittelt, jedoch fielen diese sehr unterschiedlich aus (vergl. Abb. 5.3 und 5.5 (oben)). Eine Mittelung der SRI über das gesamte Reutlinger Stadtgebiet wurde dabei vor dem Hintergrund des kleinräumigen Auftretens der hohen Niederschlagsintensitäten als nicht sinnvoll erachtet. Da die Modellierung der Ereignisse jedoch für kleine, ausgewählte EZG durchgeführt wurde und dafür Gebietsniederschläge nötig waren, die aus maximal zwei Nd.-Stationen gebildet wurden, erfolgte die SRI-Zuordnung auf Basis der EZG-Spezifischen Mittelung der Nd.-Stationen. Dabei unterschieden sich die maximalen SRI der Einzelstationen und des aus ihnen gebildeten Gebietsniederschlags jedoch teilweise erheblich, wie es für Ereignis 2016 der Fall war. Dazu hängen die gemittelten EZG-spezifischen SRI stark von der zur Erstellung des Gebietsniederschlags gewählten Methode ab.

Da die SRI-Klassifizierung der Ereignisse auf Basis von punktuell gemessenen Niederschlagsdaten erfolgte, muss davon ausgegangen werden, dass das gleiche Ereignis an einem anderen Ort einen weitaus höheren SRI erreichte. Wie in Kapitel 2.1.2 erläutert wurde, werden die Zentren von Starkregenzellen in den meisten Fällen nicht von Bodenstationen erfasst (Winterrath et al., 2018). Die Stadt Reutlingen ist durch die im Rahmen des Pilotprojekts neu installierten Niederschlagsmessstationen überdurchschnittlich gut abgedeckt. Die Stationsdichte entspricht einem Vielfachen dessen, was sonst in Siedlungsgebieten oder gar in ländlichen Räumen erreicht wird (Becker, 2016). Trotz der hohen Dichte wird durch einen Blick auf Abbildung 4.1.3 deutlich, dass auch im Falle des Ereignisses am 24. - 25. Juni 2016 die Zentren der Starkregenzellen nicht über die Bodenstationen hinweg zogen und die höchsten Niederschlagsintensitäten somit nicht aufgezeichnet wurden.

Grisa (2014) und Mudersbach (2016) sprachen sich für den Einbezug der Niederschlagsdauer aus, was mit der Methodik nach Schmitt et al. (2018) nicht erfolgt. Die Szenarien Nd. ACH 2016, Nd. ACH 2018 und Nd. NO 2018 wurden trotz teilweise unterschiedlicher Niederschlagsdauern dem gleichen SRI zugeordnet. Zwar lagen die Ereignissummen sehr nah beieinander, jedoch wurden die SRI in unterschiedlichen Dauerstufen erreicht, was für abweichende Intensitätsverläufe spricht. Entsprechend

Abbildung 2.5 würde von allen drei Szenarien die gleiche Überflutungsgefahr erwartet werden. Dies wird in Kapitel 6.3 ausführlicher erörtert.

Schmitt (2015) befand eine Loslösung von ortsbezogenen Niederschlags-Dauerlinien aufgrund der zukünftig erwarteten Veränderung des Niederschlagsverhaltens durch den Klimawandel als sinnvoll. Da das Niederschlagsgeschehen jedoch stark ortsgebunden ist, die SRI-Grenzen dementsprechend zu weit waren, und dadurch der SRI an Aussagekraft verloren hätte, verfolgte er den Ansatz nicht weiter. Wie im vorangegangenen Kapitel jedoch erwähnt wurde, ändert sich die zugrundeliegende Starkregenstatistik mit dem Klimawandel. Dies würde eine Vergleichbarkeit von zu unterschiedlichen Zeitpunkten klassifizierten Ereignissen ausschließen.

6.2 Hydrologische und hydraulische Modellierung mit RoGeR

Modellierungen sind generell mit Unsicherheiten behaftet (Apel et al., 2004). In diesem Fall kommt hinzu, dass wie in Kapitel 5.2 erläutert wurde, für die Ereignisse der Jahre 2016 und 2018 keine Validierungsdaten zur Plausibilisierung der modellierten ÜT und FG vorlagen. Dementsprechend müssen diese hinterfragt und diskutiert werden, bevor Auswertungen in Verbindung mit dem SRI vorgenommen werden können. Im folgenden Kapitel werden deshalb erst die Faktoren diskutiert, die zur Unsicherheit der Modellierungsergebnisse beitragen, um anschließend die Auswertung der ÜT- und FG-Modellierungsergebnisse in einen Zusammenhang mit den ermittelten ereignisbezogenen SRI zu bringen.

6.2.1 Realitätsnähe der Überflutungstiefen und Fließgeschwindigkeiten

Die Realitätsnähe der Häufigkeitsverteilungen der ÜT und FG hängt zum einen von der korrekten quantitativen Wiedergabe der Oberflächenabflüsse ab, zum anderen von der Güte der Modellierung der räumlichen Verteilung des oberflächlich abfließenden Wassers. Die Unsicherheit beider Faktoren setzt sich wiederum aus den Unsicherheiten der für sie maßgeblichen Prozesse zusammen, die im Folgenden diskutiert werden sollen. Dabei wird auf den Einfluss der Einzugsgebietsgröße, der Art des Niederschlagsinputs, der Vorfeuchte, der Kanalisation, des DGMs und von Validierungsdaten eingegangen.

6.2.1.1 Einzugsgebietsgröße

In der Modellierung des EZGs GOE mit der Größe von 11 km² wurde der im Leitfaden genannte Grenzwert für die Erstellung von SRGK von 5 km² überschritten (LUBW, 2016). Für die Gefahrenanalyse sind im Prinzip nur die dichter besiedelten, urbanen Flächen von Interesse, die sich im EZG GOE über nur ca. 1,5 km² erstrecken. Die EZG-Größe ließ sich jedoch nicht um die restlichen 9,5 km² reduzieren, da dadurch Außengebietswasser unberücksichtigt geblieben worden wäre, was tendenziell zur Unterschätzung von modellierten Überflutungen führt (LUBW, 2016). Die im Leitfaden angeführte Begründung für die Beschränkung auf 5 km², ist die unzulässige Akkumulation von

Abflüssen, wenn die EZG > 5 km² sind. Die entsprechend der Vorgaben des Leitfadens erstellen SRGK werden auf Grundlage der OAK, mit schon integriertem Niederschlag erstellt. Wird die hydrologische Modellierung hingegen – wie in dieser Arbeit – direkt mit RoGeR durchgeführt und der Niederschlag mittels Radarbildern räumlich differenziert übergeben, würde die Regel hinfällig werden. Da hier jedoch auf Basis von Bodenstationsdaten mit einer gleichmäßigen Überregnung des EZG modelliert wurde, kann eine Überschätzung der ÜT und FG nicht ausgeschlossen werden. In Merkblatt DWA-M 119 (DWA, 2016) wird diese Überschätzung in Hinblick auf die Gefährdungsanalyse und damit verbundener weiterer Unsicherheiten jedoch als tolerierbar bezeichnet.

Die besiedelte Fläche der Gemeinde Gönningen liegt in der unteren Hälfte des EZGs GOE, oder anders gesagt in der Nähe des Gebietsauslasses. Das modellierte Ereignis erstreckte sich über einen Zeitraum von ca. einer Stunde. Hier stellt sich die Frage, ob der gesamte im EZG gebildete Oberflächenabfluss innerhalb dieser Zeit die Siedlungsfläche erreicht hätte (Scherrer, 1997). Aufgrund der stark durch Karst geprägten Eigenschaften des EZGs im Osten, kann davon ausgegangen werden, dass ein Teil des Oberflächenabflusses in den Untergrund versickert (Scherrer, 2006). Die massiven Abweichungen von oberirdischem und unterirdischem EZG in Karstgebieten können dazu führen, dass im oberirdischen EZG gefallener Niederschlag unterirdisch einem anderen EZG zugeführt wird. Ebenso kann der versickerte Niederschlag an einer anderen Stelle im gleichen EZG konzentriert wieder an die Oberfläche gelangen (Villinger, 1997).

6.2.1.2 Niederschlagsinput

Da zu den in dieser Arbeit modellierten Niederschlagsereignissen keine Validierungsdaten in Form von Bildern oder Videos vorlagen, stellt sich die Frage, inwiefern die anhand der Messdaten der Bodenniederschlagsmessstationen modellierten Überflutungstiefen die Realität wiedergeben. Das Bodenniederschlagsmessnetz Reutlingens ist mit einer Nd.-Station auf 7 km² zwar außergewöhnlich dicht, jedoch sind Starkregenzellen meist nur wenige km² groß und weisen zusätzlich eine hohe interne Variabilität auf. Entsprechend muss davon ausgegangen werden, dass das Überflutungsgeschehen in EZG < 7 km² in Reutlingen nicht adäquat nachgebildet werden kann. Mit im Schnitt einer einzelnen Messstation im EZG kann höchstens die zeitliche Variabilität, jedoch auf keinen Fall die räumliche Variabilität erfasst werden. Da jedoch der Kern eines Niederschlagsereignisses von einer einzigen Messstationen meist nicht erfasst wird, muss auch die Repräsentativität der zeitlichen Variabilität kritisch betrachtet werden (Becker, 2016).

In Arbeitsblatt DWA-A 531 und Merkblatt DWA-M 119 ist die Übertragung einer einzigen Punktmessung als Gebietsniederschlag bis zu einer Größe von 25 km² zulässig. Die daraus resultierende, eventuelle Überschätzung des Niederschlags aufgrund der nicht beachteten räumlichen Variabilität des Niederschlags, wird aus Sicherheitsgründen als tolerierbar betrachtet (WMO, 1994; DWA, 2012; DWA, 2016). Wie Apel et al. (2016) jedoch anhand verschiedener Modellierungsszenarien identifizierten, hat die räumliche Verteilung der Niederschlagsbelastung einen hohen Einfluss auf die räumliche Verteilung

der ÜT. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass eine Modellierung mit den Radardaten der Kachelmann GmbH (2019), die RoGeR, wie in Kapitel 4.5.1 erläutert, auch übergeben werden können, in allen EZG ein anderes räumliches Muster ergeben hätte.

6.2.1.3 Vorfeuchte

Wie Marchi et al. (2010) bemerken, hat die Vorfeuchte einen bedeutenden Einfluss auf die Abflussbildungsprozesse. In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Szenarienmodellierungen beider Ereignisjahre jedoch mit den gleichen Vorfeuchtebedingungen, die über Wetterstationen in der Nähe des Reutlinger Stadtgebiets ermittelt wurden. Zum einen begrenzte der zeitliche Rahmen dieser Arbeit die Möglichkeiten, mehrere Modelläufe mit veränderten Vorfeuchtebedingungen durchzuführen. Zum anderen wäre die Vergleichbarkeit der Szenarienmodellierungen der Ereignisjahre nicht gegeben gewesen. Da der Fokus der Untersuchung auf der Auswirkung des Niederschlagsgeschehens auf die Oberflächenabflussbildung lag, wurde die Vorereignisbodenfeuchte demnach als Konstante behandelt, um die Interpretation der Ergebnisse durch Überlagerung zu vieler Einflussvariablen nicht zu verkomplizieren.

Einen weiteren Faktor stellten die großen Unsicherheiten der bestimmten Vorfeuchtebedingungen dar. Die Wahl des Zeitpunkts der Ereignisvorfeuchte fiel auf den 11. Juni 2018 um 16 Uhr. Obwohl die Wetterstation U.L. zwar näher am Reutlinger Stadtgebiet liegt als die Wetterstation O.L., dazu auf einer vergleichbareren Geländehöhe und die Bodenfeuchte in einem Boden misst, der der in allen EZG dominierenden Bodenart entspricht, wurde der Mittelwert beider Wetterstationen gewählt (vergl, Kap. 4.5.1.4). Der Grund waren die kurzen Zeitreihen, die zur Bildung Häufigkeitsverteilungen vorlagen. Da diese nur einen Ausschnitt der Grundgesamtheit darstellen und somit mit hoher Wahrscheinlichkeit von dieser abweichen, wurden alle verfügbaren Informationen herangezogen, um die Abweichung möglichst zu minimieren (Dormann, 2013). Die Unsicherheit der Daten wird durch die für das Ereignis am 24. Juni 2016 ermittelten Vorfeuchtebedingungen demonstriert. An Station O.L. ergab dies einen vollständig aufgesättigten Boden, wohingegen die Bodenfeuchte am U.L. zum gleichen Zeitpunkt um die Hälfte geringer war. Bei Betrachtung der Vol-% Bodenfeuchtewerte lagen die um 16 Uhr, 19 Uhr (11.06.2018) und 22 Uhr (24.06.2016) bestimmten Werte nur um ± 5 % auseinander (vergl, Tab. 4.7). Die darüber abgeleiteten Perzentilwerte unterschieden sich jedoch erheblich. Vor dem Anspruch der möglichst realistischen Modellierung von ÜT und FG wären dementsprechend, aufgrund der hohen Ungenauigkeit der Bodenfeuchtewerte, mehrere Modelläufe mit veränderten Ereignisvorfeuchten und die Validierung der Ergebnisse notwendig gewesen.

Auf versiegelten Flächen hat die Bodenfeuchte zwar keinen Einfluss auf das Oberflächenabflussverhalten, jedoch kann eine veränderte Bodenfeuchte einen massiven Einfluss auf anfallende Mengen von Außengebietswasser haben. Besonders das EZG GOE könnte in der Oberflächenabflussbildung sensibel auf die Vorereignisfeuchte reagieren. Mehr als die EZG ACH und

NO, da diese zu deutlich größeren Teilen versiegelt sind. Da die zur Modellierung bestimmten Vorfeuchtebedingungen eher niedrig angesetzt waren, kann davon ausgegangen werden, dass die ÜT und somit auch die FG tendenziell eher unterschätzt wurden.

6.2.1.4 Kanalisation

Die Nicht-Integration der Kanalisation kann zum einen an Überstauschächten zu einer Unterschätzung der Überflutungstiefen führen und zum anderen zu einer Überschätzung, da Wasser, das eigentlich über die Kanalisation aus dem Gebiet geleitet wird, im urbanen Raum verbleibt. Jedoch ist die Kanalisation wie in Kapitel 2.2 erwähnt nicht für extreme Niederschlagsereignisse dimensioniert und spielt ab einer gewissen Niederschlagsbelastung keine Rolle mehr. Demnach muss die Kanalisation in der hydraulischen Modellierung nicht zwangsläufig eingebunden werden. Dennoch bemerkten HSB (2017), dass modellierte ÜT unter Einbezug der Kanalisation akkurater sind. Im Fall der hier modellierten ÜT, ohne Einbindung der Kanalisation, besteht die Möglichkeit, dass eine Modellierung mit Einbindung der Kanalisation an der Häufigkeitsverteilung selbst nicht viel geändert hätte. Die räumliche Verteilung der ÜT wäre eventuell anders ausgefallen. Da die Analysen jedoch ohne räumlichen Bezug vorgenommen wurden, ist dies irrelevant (LUBW, 2016; HSB, 2017).

6.2.1.5 Qualität und Auflösung des DGMs

Nicht korrigierte Geländesenken oder Hindernisse können einen erheblichen Einfluss auf die Häufigkeitsverteilung der ÜT und FG haben. Brücken sind beispielsweise im DGM meist als Geländeerhöhungen dargestellt und nicht als durchfließbare Hindernisse. Wird dies nicht korrigiert und für die Modellierung "durchgestochen", staut sich dort oberflächlich abfließendes Wasser an und bildet unrealistisch hohe Wasserstände. Da das Wasser demnach nicht weiterfließen kann und somit eine Reduzierung des Oberflächenabflusses bewirkt wird, werden ÜT an einem der Geländeneigung folgend unterhalb gelegenen Punkt unterschätzt. Da die Korrektur des DGMs ein aufwändiger Prozess ist, konnten nur große Strukturen wie Straßenbrücken überarbeitet werden.

In urbanen Räumen können kleine Strukturen wie Bordsteine und Mauern die Fließrichtungen und somit wiederum das Überflutungsgeschehen maßgeblich beeinflussen. Diese können mit einem DGM der Auflösung 1 m x 1 m, wie es im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kam, nicht abgebildet werden. Eine höhere Auflösung der Geländeoberfläche würde die Güte und den Informationsgehalt der Modellierungsergebnisse maßgeblich beeinflussen (HSB, 2017). Den Vorteilen einer höheren Auflösung steht jedoch der massive Anstieg der benötigten Speicher- und Rechenkapazität gegenüber. Laut Apel et al. (2016) stellt der dominierende Unsicherheitsfaktor der hydraulischen Modellierung das DGM dar.

6.2.1.6 Validierungsdaten

Die zur Verfügung gestellten Informationen zu Feuerwehreinsätzen beinhalteten lediglich die Information, dass der Einsatz mit Wasser im Zusammenhang stand. Genauere Angaben wurden nicht

gemacht. Um durch Starkregen verursachte Schäden an Häusern in Zukunft zu vermeiden und Schwachstellen, sowie besonders gefährdete Bereiche in Gebieten zu identifizieren, ist die Dokumentation der Schadensursache besonders wichtig (Günthert et al., 2018). Verdeutlicht wird dies durch die unterschiedlichen Möglichkeiten der Schadensursache:

- 1. Eindringen von Oberflächenwasser
- 2. Wasserschäden im Haus durch Anschluss an das Kanalnetz ohne oder mit defekter Rückstauklappe durch Einstau in der Kanalisation. Dies kann unabhängig von oberflächlichen Überflutungen auftreten
- 3. Durch eine überlastete Kanalisation kann Wasser durch den Rückstau an Überstauschächten an die Oberfläche gedrückt werden. Liegt das private Grundstück unterhalb der Einstauhöhe der Kanalisation, können daraus Überflutungen resultieren.

Dennoch wurden bei Betrachtung der schwarz umrandeten Matrizen in Abb. 5.12, die das "reale" Szenario des Ereignisses für das entsprechende EZG darstellen sollen, im Vergleich mit den in Abbildung 4.11 dargestellten Feuerwehreinsätzen Fragen aufgeworfen. Demnach hätte EZG ACH in beiden Ereignisjahren die größte Überflutungsgefahr erfahren. Für das Jahr 2018 kann Abbildung 4.11 dies bestätigen, nicht aber für das Jahr 2016. Da davon ausgegangen werden kann, dass alle Feuerwehreinsätze für das Jahr 2016 dokumentiert wurden, wird ein Fehler auf Seiten der Modellierung vermutet.

Wie schon in Kapitel 5.2 erwähnt, lieferte auch die Umfrage auf Social Media kein brauchbares Material, da sich die Bevölkerung dessen Mehrwerts nicht bewusst ist. In einem auf dem Videoportal YouTube veröffentlichen Video, kommentiert der/die Filmende die Wasserstandshöhe während des Unwetters am 24. Juni 2016 in Reutlingen (Buchmann, 2016). Berichte dieser Art, wie auch detailliertere Feuerwehreinsatzdokumentationen – sofern dies im akuten Einsatzfall logistisch machbar ist – stellen wertvolle Informationen zur Modellvalidierung dar. Von akkurateren SRGK profitieren nicht nur die Planungsbehörden sondern auch Privatbesitzer. Mit der Abschätzung und anschließenden Kommunikation der Überflutungsgefahren mit der Bevölkerung würden zwar überflutungsverursachende Starkregenereignisse noch immer überraschend auftreten, jedoch könnte das Schadenspotenzial durch präventive Schutzmaßnahmen erheblich gesenkt werden (Stein et al., 2009).

6.3 Evaluation des Zusammenhangs: ÜT- und FG-Ausbildung & SRI

Wie in Kapitel 4.5.1 ausgeführt wurde, wird die Bildung von Oberflächenabfluss von verschiedenen ereignisabhängigen und -unabhängigen Parametern beeinflusst. Demnach können sich EZG je nach ihrer Gebietseigenschaften in ihrer Oberflächenabflussbildung stark voneinander unterscheiden (Scherrer, 2006). Die in Kapitel 5.2 dargelegten unterschiedlichen ÜT- und FG-Ausbildungen der EZG, als Reaktion auf die gleichen Niederschlagsszenarien sollen im Folgenden unter Einbeziehung der

SRI-Kategorisierung diskutiert werden. Der aktuellen, auf Schmitt et al. (2018) basierend SRI-Methodik nach, wäre zu erwarten, dass die Niederschläge mit den höchsten Indices auch die höchsten ÜT hervorrufen und Niederschläge mit den gleichen SRI zu gleichen ÜT- und FG-Ausbildungen führen.

6.3.1 Gleiches Szenario, verschiedene EZGs

Wie in Kapitel 5.2.1 erwähnt wurde, führte jedes Szenario in EZG ACH zu den höchsten und in EZG GOE zu den kleinsten ÜT. Vergleicht man die durchschnittlichen Gefälle der beiden EZG miteinander, könnte dies einen möglichen Grund darstellen. Mit einem durchschnittlichen Gefälle von 26,6 % im gesamten EZG und 14,2 % im versiegelten Gebiet, ist EZG GOE deutlich steiler als EZG ACH mit 15,5 % und 13,1 %. Höhere Gefälle führen zu höheren FG und verhindern damit die Ausbildung von hohen Wasserständen. Widerspruch erfährt die These jedoch durch die Betrachtung der innerhalb der Szenarien ausgebildeten FG in EZG ACH und EZG GOE, die in EZG ACH höher ausfielen als in EZG GOE. Einen weiteren Widerspruch bieten die ÜT in EZG NO, die demnach hätten höher ausfallen müssen als in EZG ACH, da das durchschnittliche Gefälle mit 9,7 % im gesamten EZG und 8,5 % auf versiegelten Flächen deutlich geringer ist. Stimmig in Hinblick auf das durchschnittliche Gefälle sind die geringeren FG in EZG NO als in EZG ACH und GOE. Somit lassen sich die unterschiedlich hohen ÜT nicht alleinig über das Gefälle erklären.

Wie schon erwähnt wurde, ist EZG GOE von Karst geprägt. Aufgrund der hohen Porosität von verkarstetem Kalkgestein, vermag Niederschlagswasser schnell in den Untergrund zu versickern. Das zerklüftete Kalkgestein prägt jedoch besonders die Gebiete im EZG, die in Hinsicht auf die Länge der Fließwege am weitesten von der versiegelten Fläche entfernt liegen. Wie schon in Kapitel 6.2.1.1 erwähnt wurde, stellt sich die Frage, ob das oberflächlich abfließende Wasser die Siedlungsfläche innerhalb des Ereigniszeitraums erreicht hätte. Anhang 7 verdeutlicht die verringerte bis fehlende Ausbildung von Oberflächenabfluss auf den Formationen des Oberjurakalks.

Die ganzheitlich geringeren ÜT in EZG GOE könnte auch in der Methodik der Auswertung der Modellierungsergebnisse begründet sein. Hierfür wurden aus den ÜT- und FG-Datensätzen nur die Rasterzellen extrahiert, die im Eingangsrasterdatensatz der Landnutzung als versiegelt klassifiziert waren. Dabei wurde nicht zwischen versiegelten Flächen auf Gebäude- und Straßenniveau differenziert (vergl. Kap. 4.5.1.3 "Digitales Geländemodell"). Die Frage ist, ob die prozentuale Auswertung der ÜT und der FG in den EZG andere Ergebnisse erbracht hätte, wenn alle Flächen, die in das Modell als "Hindernisse", die nur um- aber nicht überflossen werden, ausgeschlossen worden wären. EZG GOE ist zwar im Vergleich zu EZG ACH und NO deutlich geringer versiegelt, dafür weist es jedoch in Relation zur gesamten versiegelten Fläche deutlich häufiger hohe Versiegelungsgrade von > 90 % auf. Dies könnte einen höheren Anteil an Häusern bedeuten. Da Dachflächen oberhalb des Straßenniveaus liegen, findet auf ihnen keine Akkumulation von über die Geländeoberfläche zufließenden Abflüssen statt. Die ÜT wird nur über den Niederschlags-Input gebildet. Folglich wird davon ausgegangen, dass ÜT auf Dachflächen sehr gering sind. EZG GOE weist im Vergleich zu den anderen EZG einen deutlich höheren

Anteil an ÜT < 5 cm und dazu einen deutlich höheren Anteil an hohen Versiegelungsgraden auf. Deshalb wurde der Möglichkeit eines Zusammenhangs nachgegangen. Da die FG in direktem Zusammenhang mit den ÜT stehen (vergl. Kap. 4.5.1), würde erwartet werden, dass sich der größere Anteil an niedrigen Wasserständen auf Gebäuden in einem höheren Anteil von niedrigen FG wiederfände. Dies kann jedoch durch Betrachtung der FG in EZG GOE nicht bestätigt werden.

6.3.2 Verschiedene Szenarien, gleiches EZG

Die ähnlichen Häufigkeitsverhältnisse der ÜT- und FG-Klassen innerhalb des gleichen EZGs für unterschiedliche Szenarien, ließen sich über die im DGM definierte Struktur der Geländeoberfläche des EZGs begründen. Da diese in der hydraulischen Modellierung einen stationären Parameter darstellt, bilden sich Überflutungen vorzugsweise entlang der gleichen Fließwege aus. Unterschiede können auftreten, wenn Überflutungstiefen im Laufe des Ereignisses die Höhe kleiner Geländestrukturen überschreiten und somit neue Fließwege bilden. Da laut Apel et al. (2016) das DGM den auf die Überflutungsausdehnung größten Einflussparameter darstellt, werden die ähnlichen Häufigkeitsverhältnisse der ÜT- und FG-Klassen diesem zugeschrieben.

Die verschiedenen Szenarien führten innerhalb des gleichen EZGs zu erheblichen Unterschieden in der ÜT- und FG-Ausbildung. Innerhalb des gleichen betrachteten Ereignisjahres ergaben sich im Allgemeinen für höhere Ereignissummen und SRI auch höhere ÜT und FG. Werden jedoch die ÜT und FG der gleichen Ereignissummen aus unterschiedlichen Ereignisjahren miteinander verglichen gilt dieser Zusammenhang nicht mehr, da die ÜT und FG jeweils in jedem EZG im Jahr 2016 höher ausfielen. Szenarien der gleichen Ereignissummen erhielten unabhängig vom Ereignisjahr teilweise unterschiedliche SRI zugeordnet.

Wie Abbildung 5.9 verdeutlicht, ergaben sich für das Ereignis 2016 im Vergleich zu Ereignis 2018, für höhere oder gleiche SRI als für Ereignis 2018 ermittelt wurden, höhere maximale Fließgeschwindigkeiten. Dazu wurden für das Ereignis 2016 die höchsten SRI für Dauerstufen < 30 min erreicht; für Ereignis 2018 für Dauerstufen > 30 min. Daraus kann geschlossen werden, dass die maximalen FG – vereinfacht gesagt – umso höher ausfallen, je höher die in kurzen Dauerstufen erreichte Intensität ist.

In Verbindung mit den Ergebnisaussagen 1 und 2 in Kapitel 5.3 (Ergebnisaussage 1: Höherer SRI = Höhere ÜT; Ergebnisaussage 2: Gleicher SRI ≠ Gleiche ÜT) lässt sich also folgern, dass sich anhand von Niederschlagsklassifizierungen, welche zu stark verallgemeinern, keine Aussage über die Überflutungsausdehnung treffen lässt. Demnach sollte, wie schon Apel et al. (2016) bemerkten, die Klassifizierung immer über die Niederschlagsdauer, Ereignissumme und Intensitätsverlauf erfolgen, was in der SRI-Methodik nach Schmitt et al. (2018) nicht erfolgt. Demnach kann festgehalten werden, dass der in Abbildung 2.5 suggerierte Zusammenhang zwischen dem SRI und der Überflutungsgefahr nicht gültig ist. Hinzu kommt, dass auch die pluvialen Faktoren Dauer, Summe und Intensität nicht ausreichen, um Aussagen über die tatsächliche Oberflächenabflussbildung machen zu können. Wie in

Kapitel 2.3.3 anfänglich erläutert ergibt sich die tatsächliche Oberflächenabflussbildung aus komplexen Wechselwirkungen mehrerer Parameter.

6.3.3 Gefahrenklassen

Da die alleinige Darstellung von ÜT und FG dem Betrachter ohne Fachwissen keinen Aufschluss über die mögliche Gefahrenlage gibt, wird die Zuordnung von Gefahrenklassen besonders in Hinblick auf die Risikokommunikation als zielführend erachtet. Die Kombination der ÜT- und FG-Klassen mit den Gefahrenklassen nach Smith et al. (2014) bedarf jedoch weiterer Abstimmung aufeinander, wie die Zuordnung in Abbildung 5.13 verdeutlicht. Matrix-Zellen mit mehr als einer Gefahrenklasse tragen mehr zur Verwirrung als zur klaren Gefahrenkommunikation bei. Dennoch steigerte es den Mehrwert der Matrizen, indem ein Bezug zum Schadenspotenzial hergestellt werden konnte. Durch die Entkoppelung zum räumlichen Bezug mit der Darstellung in Matrizen, lässt sich ein qualitativer Vergleich der EZG anstellen. Demnach ergab sich die größte Gefahr in EZG ACH unter der Niederschlagsbelastung von Szenario Nd. S11 2016. Dabei dominierte Gefahrenklasse H5, die eine Gefahr für Fahrzeuge und Menschen und die Beschädigungen von Gebäuden ausweist. Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert wurde, lässt der SRI keine Aussage über das Überflutungsgeschehen zu. Dementsprechend folgt, dass der SRI keinen Rückschluss auf die zu erwartende Gefahrenklasse zulässt.

Mit Abbildung 2.5 und dem Titel "Risikokommunikation" machen Schmitt et al. (2018) noch einen weiteren Schritt. Sie benennen mit der Verbindung der pluvialen und der hydraulischen Komponenten nicht nur die von einem Starkregenereignis ausgehende Gefahr, sondern verbinden diese noch mit dem Schadenspotenzial, dem Wert und der Vulnerabilität eines betrachteten Objekts. Da zwischen dem SRI und der Überflutungsgefahr und somit auch der Gefahrenklasse kein direkter Zusammenhang besteht, kann einem SRI kein zu erwartender Schaden zugeordnet werden.

6.3.4 SRI zur Kommunikation mit der Bevölkerung notwendig?

Schmitt et al. (2018) verfolgte mit der Erstellung eines dimensionslosen SRI besonders die Verbesserung der Risikokommunikation mit der Bevölkerung. Wie auch die in dieser Arbeit durchgeführte Umfrage auf Social Media bestätigen konnte, fehlt das Bewusstsein für Überflutungen, die unabhängig von Fließgewässern entstehen. Im Rahmen der Umfrage auf Social Media zur Beschaffung von Validierungsmaterial, meldeten sich einige Personen, die während eines der Ereignisse mit dem Smartphone Fotos oder Videos gemacht hatten. Obwohl explizit um Material von in den Straßen stehendem Wasser, unabhängig von Fließgewässern, gebeten wurde, waren die meisten zugesandten Bilder von Fließgewässern wie der Echaz. Dies unterstreicht den von Schmitt (2014) angemerkten Aufklärungsbedarf der Bevölkerung und die Sensibilisierung für Überflutungsgefahren abseits von Gewässern. Wie im vorigen Kapitel jedoch erläutert wurde bedarf der Index weiterer Überarbeitung.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es zu prüfen, ob über den, einem Starkregenereignis zugeordneten SRI, auf die von dem Niederschlagsereignis ausgehende Überflutungsgefahr geschlossen werden kann. Der aktuellen Methodik nach Schmitt et al. (2018) zufolge, basiert der SRI auf rein pluvialen Komponenten. Dennoch wird unter anderem mittels einer Grafik zur Risikokommunikation mit der Bevölkerung ein Zusammenhang zwischen SRI und Überflutungsgefahr suggeriert. Je nach Ergebnis sollte auch die Notwendigkeit der Anpassung des rein pluvialen SRI auf die EZG-spezifischen, die Oberflächenabflussbildung beeinflussenden Eigenschaften und Parameter, geprüft werden.

Zur Erörterung der genannten Fragestellung wurden drei EZG mit unterschiedlichen Eigenschaften innerhalb des Reutlinger Stadtgebiets ausgewählt und deren Oberflächenabflussbildung mit dem Modell RoGeR für verschiedene Niederschlagsszenarien modelliert. Die Szenarien ergaben sich aus zwei im Reutlinger Stadtgebiet in der Vergangenheit niedergegangenen Starkregenereignissen. Um die Modellierungsergebnisse mit dem SRI in einen Zusammenhang zu bringen, wurden die Niederschlagsszenarien, der aktuellen SRI-Methodik entsprechend, einem SRI zugeordnet. Die Auswertung der Modellierung erfolgte anhand der maximal über den gesamten Ereigniszeitraum aufgetretenen ÜT und FG auf den im EZG versiegelten Flächen. Zur Evaluierung der Überflutungsgefahr wurden die Parameter ÜT und FG kombiniert und Gefahrenklassen zugeordnet. Da die Oberflächenabflussbildung in einem EZG durch verschiedene Parameter beeinflusst wird, der Fokus in dieser Arbeit im Rahmen der SRI-Thematik jedoch auf dem Einfluss der pluvialen Komponente lag, unterschieden sich die Modellläufe nur in der Niederschlagsbelastung.

Die SRI-Klassifizierung der Niederschläge der einzelnen Szenarien erfolgte über den in einer Dauerstufe maximal erreichten SRI. Dabei ist keine Information zur Gesamtdauer, der Ereignissumme und des Intensitätsverlauf enthalten. Obwohl die Modellierung der ÜT und FG, wie auch die Auswertung der Ergebnisse mit Unsicherheiten behaftet sind, ließen sich qualitative Vergleiche zwischen den EZG anstellen. Dabei konnten erhebliche Unterschiede zwischen den Reaktionen der EZG auf das gleiche Niederschlagsszenario identifiziert werden, wie auch innerhalb eines EZG auf unterschiedliche Niederschlagsszenarien. Die Verknüpfung der SRI- und Modellierungsergebnisse ließ sich in gegensätzlichen Ergebnisaussagen zusammenfassen:

Ergebnisaussage 1: Höherer SRI = Höhere ÜT

Niederschlagsereignisse mit geringfügig unterschiedlichen Dauern, gleichen Ereignissummen, sowie qualitativ ähnlichen Intensitätsverläufen, jedoch unterschiedlich hohen SRI, führten hingegen im gleichen EZG für die hohen SRI auch zu höheren ÜT.

Ergebnisaussage 2: Gleicher SRI ≠ Gleiche ÜT

Niederschläge von nahezu gleichen Dauern und Ereignissummen, mit unterschiedlichen qualitativen Intensitätsverläufen und gleichen SRI, die jedoch in unterschiedlichen Dauerstufen erreicht wurden, führten im gleichen EZG zu voneinander abweichenden Oberflächenabflussbildungen.

Demnach konnte ein klarer Zusammenhang zwischen der Niederschlagsdauer, -ereignissumme und -intensität und der Oberflächenabflussbildung abgeleitet werden. Dabei bildeten sich die höchsten ÜT und FG für hohe Niederschlagsintensitäten in geringen Dauerstufen aus. Die Thesen stützen sich allerdings lediglich auf die Modellierung zweier verschiedener Ereignisse. Mit der Modellierung des Ereignisses am 7. Juni 2018 – besonders der Nd.-Station 5 (Anh. Abb. 6) – hätten eventuell wertvolle Informationen gewonnen werden können, die die These entweder weiter hätten bestätigen, oder wiederlegen können. Detaillierte Aussagen zu Abhängigkeiten können demnach nur auf Basis einer Sensitivitätsanalyse vielzähliger Modellläufe getroffen werden, die Apel et al. (2008) im Rahmen der Ermittlung der Überflutungsgefährdung als zwingend notwendig erachten, insbesondere da die ermittelte Überflutungsgefähr im Rahmen des Starkregenmanagements die Grundlage der Maßnahmenplanung darstellen soll.

Dennoch kann die Aussage getroffen werden, dass der SRI seiner aktuellen Definition nach, die Niederschlagsereignisse zu stark vereinfachend beschreibt und somit keine Aussage über die zu erwartende Überflutungsgefahr zulässt. Darüber hinaus könnte mit einem SRI, der die Dauer, Ereignismenge und Intensität berücksichtig auch keine Aussage über Überflutungstiefen getroffen werden, da diese neben den pluvialen Faktoren von weiteren Parametern beeinflusst werden.

In Hinblick auf die Unsicherheiten der Modellierten ÜT und FG wäre eine höhere Auflösung des DGM förderlich. Speziell die detaillierte Modellierung besonders vulnerabler Gebiete und Gebäude würde von einer erhöhten Genauigkeit profitieren. Den Vorteilen einer höheren Auflösung steht jedoch der massive Anstieg der benötigen Speicher- und Rechenkapazität gegenüber. Da sich die Modellierung entsprechend auf ein Gebiet geringerer Ausdehnung bezieht, relativiert sich dies. Ein weiterer zu prüfender Faktor wäre der Einfluss einer eingebundenen Kanalisation auf die ÜT.

Da Validierungsdaten die Modellierungsergebnisse erheblich verbessern können, sollten verschiedene Bezugsmöglichkeiten untersucht werden. Detailliertere Einsatzdokumentationen der Feuerwehr könnten anhand eines normierten Fragebogens erleichtert werden, da im Einsatzfall die hydrologisch relevante Dokumentation keine Priorität hat.

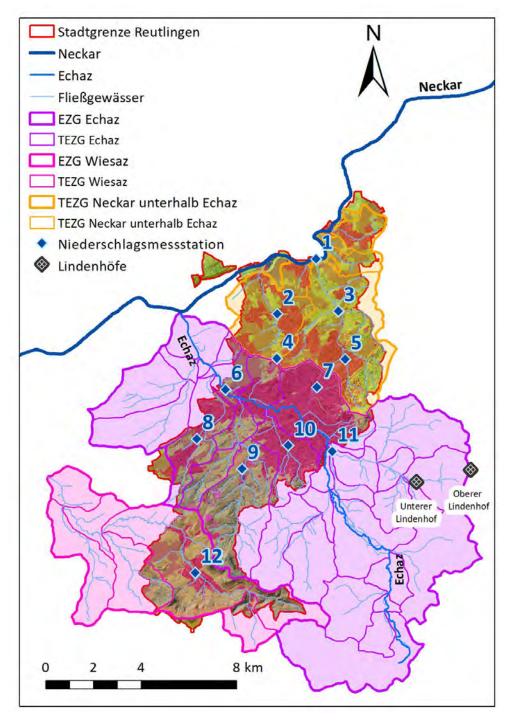
Da die Niederschlagsbelastung, wie in dieser Arbeit gezeigt werden konnte, einen erheblichen Einfluss auf die Oberflächenabflussbildung hat, sollten zukünftige Modellierungen mit räumlich und zeitlich variablen Niederschlagsbelastungen in Form von Radardaten durchgeführt werden, anstatt von räumlich stationären Gebietsniederschlägen. Die Kachelmann GmbH stellte zwar Radardaten zu den Ereignissen 2016 und 2018 in 5-minütigen Summen zur Verfügung, jedoch ließ der zeitliche Rahmen dieser Arbeit

keine weiteren Modellläufe mit räumlich differenzierten Radardaten zu. Weiter sollte auch die SRI-Klassifizierung die räumliche und zeitliche Variabilität des zu beschreibenden Ereignisses berücksichtigen.

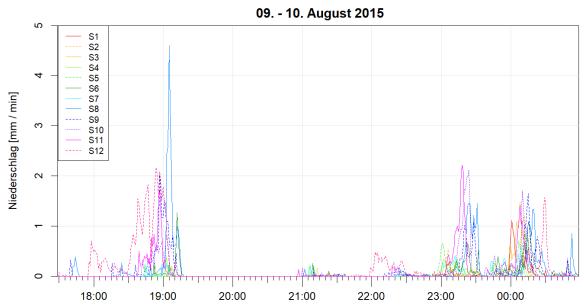
In Hinblick auf die Entwicklung eines Starkregen-Frühwarnsystems stellt eine Live-SRI-Karte, wie sie für die Stadt Hamburg realisiert ist, einen vielversprechenden Ansatz dar. Dazu könnte die Ausgabe einer Warnung integriert werden, sobald eine Starkregenzelle eines gewissen definierten SRI-Schwellenwerts über eine radiale, um die Stadt gezogene Grenze in Richtung der Siedlungsflächen zieht. Sollte die Starkregenzelle die Siedlungsfläche tatsächlich mit der zum Zeitpunkt der Warnung angegebenen Intensität treffen, wäre somit eine gewisse Vorwarnzeit gegeben.

Die Untersuchungen zum SRI als geeignetem Instrument für Kommunen zur Gefahrenabwehr von durch Starkregenereignissen verursachten Überflutungen, sollten nicht bei der Verknüpfung des SRI mit wild abfließendem Wasser in urbanen Räumen, das in SRGKs räumlich differenziert dargestellt wird enden, sondern auf die von Fließgewässern ausgehende Überschwemmungsgefahr ausgeweitet werden. Von besonderem Interesse ist der Beitrag einzelner Teileinzugsgebiete zum Hochwasser, wenn diese von einem lokalen Starkregenereignis betroffen sind.

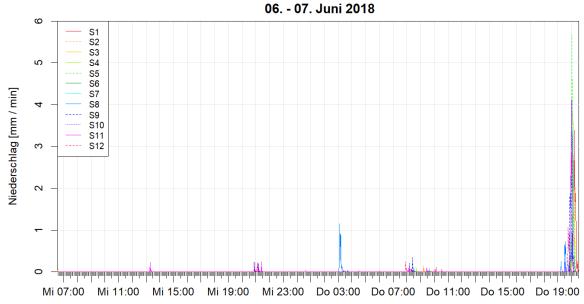
Wie diese Arbeit zeigen konnte, werden die in einem EZG ablaufenden Oberflächenabflussprozesse von komplexen Parameter-Zusammenhängen beeinflusst. Die aktuelle SRI-Methodik wird dieser Komplexität, mit der Einbeziehung von nur einem der Parameter, nicht gerecht. Demnach muss eine klare Trennung des rein pluvialen Starkregenindex von der Überflutungsgefahr erfolgen und um diese zu kommunizieren, auf einen neu zu definierenden, hydrologischen und hydraulischen Index zurückgegriffen werden.



Anhang Abbildung 1 Darstellung des Reutlinger Stadtgebiets mit den EZG der Echaz, der Wiesaz, Teileinzugsgebeiten (TEZG) des Neckars und deren TEZG



Anhang Abbildung 2 Grafik des durch das Reutlinger Bodenmessnetz aufgezeichnete Starkregenereignis im August 2015



Anhang Abbildung 3 Grafik des durch das Reutlinger Bodenmessnetz aufgezeichnete Starkregenereignis Anfang Juni 2018

Anhang 3

Anhang Tabelle 1 Maxima der gebildeten Dauerstufen Niederschlagsstationen im Reutlinger Stadtgebiet für das Ereignis am 24.-25. Juni 2016

Dauer-	S	1	S	2		3	S	4	S	5		6
stufe	Nied.		Nied.		Nied.		Nied.		Nied.		Nied.	
	[mm]	Zeit	[mm]	Zeit	[mm]	Zeit	[mm]	Zeit	[mm]	Zeit	[mm]	Zeit
5	2,8	22:32	4,0	22:22	4,8	22:38	4,3	22:32	4,9	22:41	12,0	22:14
10	4,8	22:33	6,4	22:27	8,9	22:44	7,2	22:37	7,7	22:42	21,2	22:18
15	6,4	22:33	8,1	22:31	11,5	22:47	9,6	22:42	9,7	22:46	27,4	22:22
20	7,3	22:38	9,7	22:37	12,8	22:51	11,9	22:47	11,1	22:47	31,1	22:25
30	10,4	22:49	12,4	22:47	14,1	22:57	15,2	22:46	13,2	22:53	36,8	22:35
45	11,9	23:03	15,4	22:51	15,5	22:54	20,1	22:50	15,4	22:46	42,5	22:48
60	12,3	23:18	16,0	22:59	16,5	23:03	20,5	22:56	18,0	22:59	43,2	22:55
90	13,2	23:48	16,7	23:35	17,5	23:36	20,9	23:25	19,2	23:24	43,6	23:30
120	14,1	00:10	18,0	00:07	18,1	00:04	22,5	00:05	20,0	23:59	44,9	00:03
180	17,1	01:09	20,5	01:07	21,3	01:05	25,1	01:02	23,1	00:59	47,6	01:03
240	17,7	01:53	21,3	02:02	22,1	01:15	25,9	02:01	24,1	01:41	48,4	01:35
360	18,0	03:33	21,7	03:32	23,0	03:16	26,7	03:33	25,0	03:27	49,2	03:26
Dauer-		7		8		9		10		11		12
stufe	Nied.	7 4	Nied.	7	Nied.	7	Nied.	7 4	Nied.	7	Nied.	7 .
5	[mm] 5,6	Zeit 22:37	[mm] 7,8	Zeit 22:23	[mm] 15,4	Zeit 22:16	[mm] 9,6	Zeit 22:33	[mm] 17,5	Zeit 22:29	[mm] 16,2	Zeit 22:02
	-				-		-				· ·	
10	9,8	22:38	14,4	22:24	23,5	22:19	16,8	22:33	29,0	22:30	29,4	22:05
15	12,7	22:40	18,8	22:23	29,9	22:21	22,3	22:34	36,8	22:34	36,6	22:09
20	15,0	22:43	23,3	22:26	34,8	22:24	26,9	22:35	40,8	22:39	39,3	22:10
30	17,8	22:49	29,7	22:29	42,6	22:34	38,7	22:34	47,9	22:41	41,4	22:16
45	23,1	22:46	35,5	22:39	50,7	22:41	49,2	22:41	52,2	22:42	41,8	22:33
60	24,8	23:00	37,7	22:48	52,0	22:55	53,5	22:50	54,0	22:49	43,5	22:46
90	25,5	23:23	37,8	22:51	52,5	23:03	54,1	23:07	55,2	23:16	43,5	22:46
120	26,3	00:01	38,5	23:30	53,2	23:55	54,6	23:41	22,2	23:22	43,5	23:07
180	28,7	01:01	40,8	00:48	56,3	00:53	58,2	00:50	57,6	00:46	46,6	00:47
240	29,6	02:00	42,4	01:45	57,2	01:55	59,0	01:41	58,6	01:46	48,2	01:44
360	30,51	03:20	43,2	03:20	58,0	03:13	60,1	03:18	59,5	03:30	49,2	03:27

Anhang Tabelle 2 Maxima der gebildeten Dauerstufen Niederschlagsstationen im Reutlinger Stadtgebiet für das Ereignis am 11. Juni 2018

D	S	1	S	2	S	3	S	4	S	5	S	6
Dauer- stufe	Nied.											
	[mm]	Zeit										
5	5,2	19:23	6,2	19:18	4,4	19:01	4,0	19:35	6,7	19:08	-	-
10	8,1	19:22	11,6	19:19	7,4	19:15	5,9	19:37	13,1	19:12	-	-
15	11,1	19:24	15,8	19:18	11,1	19:10	8,3	19:16	18,7	19:17	-	-
20	14,5	19:21	18,8	19:23	14,5	19:15	10,0	19:16	23,1	19:21	-	-
30	20,0	19:30	21,1	19:27	21,4	19:25	12,7	19:16	30,2	19:26	-	-
45	26,1	19:46	26,8	19:45	27,8	19:41	18,5	19:37	39,2	19:41	-	-
60	30,2	19:52	28,2	19:48	32,6	19:49	22,7	19:44	41,9	19:52	-	-
Dauer-	S	7	S	8	S	9	S	10	S	11	S	12
stufe	Nied.											
	[mm]	Zeit										
5	7,7	19:15	6,4	19:00	4,8	19:26	8,4	19:26	11,0	19:12	6,7	18:58
10	13,2	19:39	7,9	19:04	8,2	19:29	14,4	19:27	18,6	19:13	12,3	19:00
15	15,7	19:22	8,5	19:04	10,8	19:15	19,9	19:30	22,3	19:15	15,4	19:03
20	19,8	19:17	8,9	19:07	14,1	19:26	23,3	19:31	26,5	19:24	17,2	19:10
30	29,5	19:39	9,6	19:07	20,9	19:30	32,6	19:31	40,1	19:33	20,6	19:20
45	40,0	19:40	13,0	19:38	25,8	19:40	35,5	19:43	46,1	19:42	25,0	19:31
60	43,5	19:51	14,1	19:37	26,4	19:40	36,4	19:51	46,7	19:52	25,3	19:39

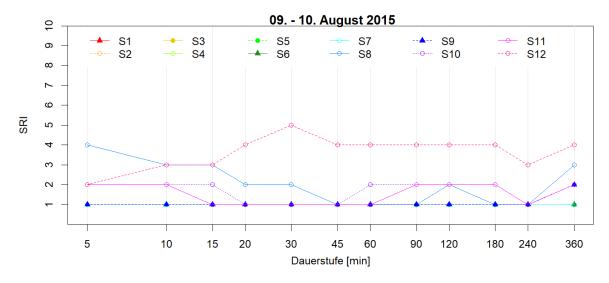
Wiederkehrzeit T _n [a]	1	2	m	2	10		25	30		100					> 100				
Kategorie		Starkregen	regen			intensiver	tensiver Starkregen		außergewöhnlic	her Starkregen				ext	extremer Starkregen	ua			
Starkregenindex SRI [-]	1	1	2	2	3	4	4	2	9	7		8		6	10	0	11		12
Erhöhungsfaktor [-]										1,00	1,20	- 1,39	1,40	- 1,59	1,60	2,19	2,20 -	2,79	≥ 2,80
Dauerstufe D									Nieders	Niederschlagshöhe h _N [mm]	lmu]					•	•	٠	
5 min	5,7	7,9	9,2	10,9	13,1	15,4	16,1	16,7	18,3	20,6	24,7	28,6	28,8	32,8	33	45,1	45,3	57,5	2,72
10 min	6	11,9	13,6	15,7	18,6	21,5	22,4	23,2	25,3	28,2	33,8	39,2	39,5	44,8	45,1	61,8	62	78,7	79
15 min	11,2	14,5	16,5	19	22,3	25,6	26,7	27,6	30,1	33,4	40,1	46,4	46,8	53,1	53,4	73,1	73,5	93,2	93,5
20 min	12,7	16,5	18,6	21,4	25,1	28,8	30	31	33,7	37,4	44,9	52	52,4	5'65	8'65	81,9	82,3	104,3	104,7
30 min	14,8	161	21,6	24,8	29,1	33,4	34,8	35,9	39,1	43,4	52,1	60,3	8'09	69	69,4	95	5'56	121,1	121,5
45 min	16,5	21,5	24,5	28,1	33,1	38,1	39,7	41	44,7	49,7	9'65	69,1	9'69	62	79,5	108,8	109,3	138,7	139,2
60 min	17,6	23,1	26,4	30,5	36	41,5	43,3	44,8	48,9	54,4	65,3	9'5'	76,2	86,5	87	119,1	119,7	151,8	152,3
90 min	19,2	25	28,4	32,7	38,5	44,3	46,2	47,7	52	57,8	69,4	80,3	6'08	91,9	92,5	126,6	127,2	161,3	161,8
2 h	20,4	26,4	29,9	34,3	40,3	46,3	48,3	49,8	54,3	60,3	72,4	83,8	84,4	6'56	5'96	132,1	132,7	168,2	168,8
3.h	22,2	28,5	32,2	36,8	43,1	46,4	51,4	53,1	27,72	64	76,8	88	9,68	101,8	102,4	140,2	140,8	178,6	179,2
4 h	23,6	30,1	33,9	38,7	45,2	51,7	53,9	9'55	60,3	6'99	80,3	93	93,7	106,4	107	146,5	147,2	186,7	187,3
6 h	25,7	32,5	36,5	41,6	48,4	55,2	57,4	59,2	64,2	71,1	85,3	8'86	5'66	113	113,8	155,7	156,4	198,4	199,1
9 h	28	35,2	39,4	44,6	51,8	59	61,3	63,1	68,4	75,6	2'06	105,1	105,8	120,2	121	165,6	166,3	210,9	211,7
12 h	29,8	37,2	41,5	47	54,4	61,8	64,2	66,1	71,6	6/	94,8	109,8	110,6	125,6	126,4	173	173,8	220,4	221,2
18 h	32,5	40,2	44,8	50,5	58,2	99	68,5	70,5	76,2	84	100,8	116,8	117,6	133,6	134,4	184	184,8	234,4	235,2
1 d	34,5	42,5	47,2	53,1	61,2	69,2	71,8	73,9	8'64	87,8	105,4	122	122,9	139,6	140,5	192,3	193,2	245	245,8
2 d	46,5	95	61,6	9'89	78,1	9'28	2'06	93,1	100,2	109,7	131,6	152,5	153,6	174,4	175,5	240,2	241,3	306,1	307,2
3 d	55,4	8'59	71,8	2'62	868	100,2	103,6	106,3	113,9	124,3	149,2	172,8	174	197,6	198,9	272,2	273,5	346,8	348
							Stark	regenindex	Starkregenindex SRI für das KOSTRA Raster 89027	STRA Raster 8	9027								
Wiederkehrzeit T., [a]	1	2	e	5	10	20	25	30	90	100					> 100				
Kategorie		Starkregen	regen			intensiver	tensiver Starkregen		außergewöhnlicher Starkregen	her Starkregen				ext	extremer Starkregen	na.			
Starkregenindex SRI [-]	1	1	2	2	3	4	4	5	9	7		8		9	1	10	11		12
Erhöhungsfaktor [-]										1,00	1,20	- 1,39	1,40	- 1,59	1,60 -	2,19	2,20 -	2,79	≥ 2,80
Dauerstufe D									Nieders	Niederschlagshöhe h _N [mm]	nm]								
5 min	6,3	8,8	10,3	12,2	14,8	17,3	18,2	18,8	20,7	23,3	28	32,4	32,6	37	37,3	51	51,3	65	65,2
10 min	6′6	13,2	15,2	17,6	20,9	24,2	25,3	26,2	28,6	31,9	38,3	44,3	44,7	20,7	51	6'69	70,2	68	89,3
15 min	12,3	16,2	18,4	21,2	25,1	29	30,2	31,2	34	37,9	45,5	52,7	53,1	60,3	9'09	83	83,4	105,7	106,1
20 min	14	18,3	20,8	23,9	28,2	32,5	33,9	35	38,2	42,5	51	59,1	5,65	9′29	89	93,1	93,5	118,6	119
30 min	16,2	21,2	24,1	27,8	32,8	37,8	39,4	40,7	44,4	49,4	59,3	68,7	69,2	78,5	79	108,2	108,7	137,8	138,3
45 min	18,1	23,9	27,3	31,6	37,4	43,2	45,1	46,6	50,9	26,7	89	78,8	79,4	90,2	2'06	124,2	124,7	158,2	158,8
60 min	19,2	25,7	29,5	34,2	40,7	47,2	49,3	51	55,7	62,2	74,6	86,5	87,1	6'86	5,66	136,2	136,8	173,5	174,2
90 min	21,1	27,6	31,4	36,2	42,8	49,3	51,4	53,1	28	64,5	77,4	2'68	90,3	102,6	103,2	141,3	141,9	180	180,6
2 h	22,5	29,1	32,9	37,8	44,4	50,9	53	54,8	9,65	66,2	79,4	92	92,7	105,3	105,9	145	145,6	184,7	185,4
3 h	24,7	31,3	35,2	40,1	46,8	53,4	55,5	57,3	62,2	8'89	82,6	92'6	6,3	109,4	110,1	150,7	151,4	192	192,6
4 h	26,4	33,1	37	41,9	48,6	55,3	57,4	59,2	64,1	70,8	85	98,4	99,1	112,6	113,3	155,1	155,8	197,5	198,2
6 h	29	35,7	39,7	44,6	51,4	58,2	60,3	62,1	67,1	73,8	88,6	102,6	103,3	117,3	118,1	161,6	162,4	205,9	206,6
9 h	31,8	38,6	42,6	47,6	54,4	61,3	63,5	65,3	70,3	77,1	92,5	107,2	107,9	122,6	123,4	168,8	169,6	215,1	215,9
12 h	33,9	40,8	44,8	49,9	56,8	9'89	65,8	2'29	72,7	9'62	5,56	110,6	111,4	126,6	127,4	174,3	175,1	222,1	222,9
18 h	37,3	44,2	48,3	53,4	60,3	67,2	5'69	71,3	76,4	83,3	100	115,8	116,6	132,4	133,3	182,4	183,3	232,4	233,2
1.0	39,8	46,8	50,9	56	63	20	72,2	74,1	79,2	86,2	103,4	119,8	120,7	137,1	137,9	188,8	189,6	240,5	241,4
2 d	47,6	56,5	61,7	68,2	77,1	98	88'8	91,2	7,79	106,6	127,9	148,2	149,2	169,5	170,6	233,5	234,5	297,4	298,5
3 d	52,9	62,9	68,7	76,1	86	96	99,2	101,9	109,2	119,2	143	165,7	166,9	189,5	190,7	261	262,2	332,6	333,8

							Stark	regenindex	Starkregenindex SRI für das KOSTRA Raster 87028	TRA Raster 8	7028								
Wiederkehrzeit T _n [a]	1	2	က	2	10	20	25	30	50	100					> 100				
Kategorie		Starkregen	regen			intensiver	ntensiver Starkregen		außergewöhnlich	icher Starkregen				extr	extremer Starkregen	en			
Starkregenindex SRI [-]	1	1	2	2	60	4	4	2	9	7			6		10	0	11		12
Erhöhungsfaktor [-]										1,00	1,20	- 1,39	1,40 -	1,59	1,60 -	2,19	2,20 -	2,79	≥ 2,80
Dauerstufe D									Nieders	Niederschlagshöhe h _N [mm]	[mt								
5 min	5,7	7,8	6	10,5	12,6	14,7	15,3	15,9	17,4	19,5	23,4	27,1	27,3	31	31,2	42,7	42,9	54,4	54,6
10 min	6	11,7	13,4	15,4	18,2	21	21,9	22,7	24,7	27,5	33	38,2	38,5	43,7	44	60,2	60,5	76,7	77
15 min	11,1	14,4	16,3	18,8	22,1	25,4	26,5	27,3	29,8	33,1	39,7	46	46,3	52,6	53	72,5	72,8	92,3	92,7
20 min	12,6	16,3	18,5	21,3	25	28,8	29,9	31	33,7	37,4	44,9	52	52,4	5,65	59,8	81,9	82,3	104,3	104,7
30 min	14,6	19	21,6	24,9	29,3	33,8	35,2	36,4	39,6	44,1	52,9	61,3	61,7	70,1	9'02	96,6	6	123	123,5
45 min	16,3	21,6	24,6	28,5	33,8	39	40,8	42,1	46	51,3	61,6	71,3	71,8	81,6	82,1	112,3	112,9	143,1	143,6
60 min	17,3	23,2	26,7	31,1	37	43	44,9	46,5	50,9	56,8	68,2	79	79,5	80,3	6'06	124,4	125	158,5	159
90 min	18,9	25,2	28,9	33,5	39,8	46,1	48	49,7	54,3	9'09	72,7	84,2	84,8	96,4	26	132,7	133,3	169,1	169,7
2 h	20,2	26,7	30,5	35,3	41,8	48,4	50'2	52,2	25	63,5	76,2	88,3	6'88	101	101,6	139,1	139,7	177,2	177,8
3 h	22,1	29	33	38,1	45	51,8	54	55,8	6'09	8'29	81,4	94,2	6'46	107,8	108,5	148,5	149,2	189,2	189,8
4 h	23,6	30,7	34,9	40,2	47,3	54,4	26,7	58,6	6'89	71	85,2	7,86	4'66	112,9	113,6	155,5	156,2	198,1	198,8
6 h	25,9	33,4	37,8	43,3	50,9	58,4	8'09	62,8	68,3	6'52	91,1	105,5	106,3	120,7	121,4	166,2	167	211,8	212,5
9 h	28,3	86,3	6'04	46,8	54,7	62,6	65,2	67,3	73,1	81,1	6,76	112,7	113,5	128,9	129,8	177,6	178,4	226,3	227,1
12 h	30,2	38,5	43,3	46,4	9'25	8'59	68,5	7,07	16,7	85	102	118,1	119	135,2	136	186,2	187	237,2	238
18 h	33,1	41,8	6'94	53,3	62	1,07	73,5	75,8	82,2	6'06	109,1	126,4	127,3	144,5	145,4	199,1	200	253,6	254,5
1 d	35,3	44,3	49,6	56,3	65,3	74,3	77,2	9'62	86,3	95,3	114,4	132,5	133,4	151,5	152,5	208,7	209,7	265,9	266,8
2 d	44,6	54,4	60,2	67,4	77,2	87,1	90,2	92,8	100,1	109,9	131,9	152,8	153,9	174,7	175,8	240,7	241,8	306,6	7,708
3 d	51,1	61,4	4,79	75	85,3	9'56	6'86	101,6	109,2	119,5	143,4	166,1	167,3	190	191,2	261,7	262,9	333,4	334,6
							Stark	regenindex	Starkregenindex SRI für das KOSTRA Raster 88028	TRA Raster 8	8028								
Wiederkehrzeit T., [a]	1	2	en	2	10	20	25	30	20	100					> 100				
Kategorie		Starkregen	regen			intensiver	ntensiver Starkregen		außergewöhnlich	her Starkregen				extr	extremer Starkregen	en			
Starkregenindex SRI [-]	1	1	2	2	60	4	4	2	9	7		88	6		10	0	11		12
Erhöhungsfaktor [-]										1,00	1,20	- 1,39	1,40 -	1,59	1,60	2,19	2,20 -	2,79	≥ 2,80
Dauerstufe D									Nieders	Niederschlagshöhe h _N [mm	[mt							,	
5 min	6,1	8,5	6'6	11,7	14,1	16,5	17,4	18	19,8	22,2	26,6	30,9	31,1	35,3	35,5	48,6	48,8	6,19	62,2
10 min	9'6	12,8	14,6	16,9	20,1	23,2	24,3	25,1	27,4	30,6	36,7	42,5	42,8	48,7	49	29	67,3	85,4	7,28
15 min	11,9	15,6	17,71	20,5	24,2	27,8	29	30	32,7	36,4	43,7	50,6	51	6,72	58,2	7,67	80,1	101,6	101,9
20 min	13,5	17,6	20	23,1	27,2	31,3	32,7	33,7	36,8	40,9	49,1	56,9	57,3	92	65,4	9,68	06	114,1	114,5
30 min	15,7	20,5	23,3	26,8	31,6	36,4	38	39,2	42,8	47,6	57,1	66,2	9'99	75,7	76,2	104,2	104,7	132,8	133,3
45 min	17,5	23,1	26,4	30,5	36,1	41,8	43,6	45	49,2	54,8	65,8	76,2	76,7	87,1	7,78	120	120,6	152,9	153,4
60 min	18,6	24,9	28,5	33,1	39,4	45,7	47,7	49,3	53,9	60,2	72,2	83,7	84,3	7,26	6,36	131,8	132,4	168	168,6
90 min	20,4	26,9	30,8	35,6	42,2	48,8	50,9	52,6	57,5	64	76,8	89	9'68	101,8	102,4	140,2	140,8	178,6	179,2
2 h	21,7	28,5	32,5	37,5	44,3	51,1	53,3	55,1	60,1	6'99	80,3	93	93,7	106,4	107	146,5	147,2	186,7	187,3
3.h	23,8	30,9	35,1	40,4	47,5	54,6	56,9	58,8	64,1	71,2	85,4	66	2'66	113,2	113,9	155,9	156,6	198,6	199,4
4 h	25,4	32,8	37,1	42,5	49,9	57,3	59,7	61,6	67,1	74,5	89,4	103,6	104,3	118,5	119,2	163,2	163,9	207,9	208,6
6 h	27,8	35,5	40,1	45,8	53,5	61,3	63,8	65,8	71,6	79,3	95,2	110,2	111	126,1	126,9	173,7	174,5	221,2	222
9 h	30,4	38,6	43,3	49,3	57,5	9'59	68,2	70,4	76,4	84,5	101,4	117,5	118,3	134,4	135,2	185,1	185,9	235,8	236,6
12 h	32,5	40,9	45,8	52	60,4	6'89	71,6	73,8	80	88,4	106,1	122,9	123,8	140,6	141,4	193,6	194,5	246,6	247,5
18 h	35,5	44,4	49,5	56,1	64,9	73,8	76,6	78,9	85,4	94,3	113,2	131,1	132	149,9	150,9	206,5	207,5	263,1	264
1 d	37,9	47,1	52,4	59,1	68,3	5'22	80,4	82,8	89,5	7,86	118,4	137,2	138,2	156,9	157,9	216,2	217,1	275,4	276,4
2 d	47,3	57,3	63,2	70,5	80,5	5'06	93,7	6,3	103,7	113,7	136,4	158	159,2	180,8	181,9	249	250,1	317,2	318,4
3 d	53,9	64,4	70,5	78,2	88,7	99,2	102,5	105,3	113	123,5	148,2	171,7	172,9	196,4	197,6	270,5	271,7	344,6	345,8

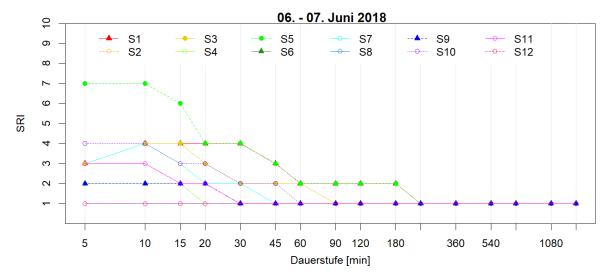
			12	≥ 2,80		62,7	87,6	104,7	117,9	138	159,9	176,4	186,8	194,9	206,9	216,2	230,4	245,8	257,9	276,4	290,4	339,4	370,7
			11	- 2,79		62,5	87,3	104,3	117,5	137,5	159,3	175,8	186,1	194,2	206,2	215,4	229,6	245	257	275,4	289,3	338,1	369,4
				2,20		49,3	6'89	82,3	92,6	108,5	125,6	138,6	146,7	153,1	162,6	169,8	181,1	193,2	202,6	217,1	228,1	266,6	291,3
		gen	10	- 2,19		49,1	68,5	81,9	92,2	108	125	138	146,1	152,4	161,8	169,1	180,2	192,3	201,7	216,2	227,1	265,4	290
	> 100	extremer Starkregen		1,60		35,8	50,1	8'65	67,4	78,9	91,4	100,8	106,7	111,4	118,2	123,5	131,7	140,5	147,4	157,9	165,9	193,9	211,8
		ex	6	- 1,59		35,6	49,8	5,65	6'99	78,4	8'06	100,2	106,1	110,7	117,5	122,7	130,9	139,6	146,4	156,9	164,9	192,7	210,5
				1,40		31,4	43,8	52,4	58,9	69	6'62	88,2	93,4	97,4	103,5	108,1	115,2	122,9	128,9	138,2	145,2	169,7	185,4
			80	- 1,39		31,1	43,5	52	58,5	68,5	79,4	87,6	92,7	2'96	102,7	107,3	114,4	122	128	137,2	144,1	168,5	184
89028				1,20	[mm]	26,9	37,6	44,9	50,5	59,2	68,5	75,6	80	83,5	88,7	92,6	8'86	105,4	110,5	118,4	124,4	145,4	158,9
Starkregenindex SRI für das KOSTRA Raster 89028	100	außergewöhnlicher Starkregen	7	1,00	Niederschlagshöhe h _N [mm]	22,4	31,3	37,4	42,1	49,3	57,1	63	66,7	9'69	73,9	77,2	82,3	87,8	92,1	98,7	103,7	121,2	132,4
SRI für das KC	90	außergewöhnli	9		Niede	20	28	33,6	37,9	44,3	51,2	56,4	59,9	62,6	66,7	6'69	74,8	80,1	84,2	90,5	95,3	111,7	122,3
regenindex (30		2			18,2	25,7	30,8	34,8	40,6	46,9	51,5	54,9	57,5	61,5	64,5	69,2	74,4	78,3	84,5	89,2	104,8	114,9
Stark	25	Starkregen	4			17,5	24,8	29,8	33,6	39,3	45,3	49,8	53,1	55,7	9'65	62,6	67,2	72,3	76,2	82,3	87	102,3	112,3
	20	intensiver Starkregen	4			16,8	23,8	28,6	32,3	37,7	43,4	47,7	50,9	53,4	57,3	60,2	64,8	8'69	73,7	7,67	84,3	8,66	109
	10		က			14,3	20,5	24,8	28	32,7	37,5	41,1	44,1	46,5	50,1	52,9	57,2	62	65,8	71,5	76	8,68	66
	2		2			11,9	17,3	21	23,8	27,72	31,6	34,4	37,3	39,5	42,9	45,6	49,7	54,3	57,8	63,3	9'29	80,4	88,9
	3	Starkregen	2			10,1	14,9	18,2	20,6	24	27,3	29,6	32,3	34,4	7,78	40,2	44,1	48,5	52	57,3	61,4	73,4	81,5
	2	Star	1			8,7	13,1	16	18,1	21,1	23,9	25,7	28,3	30,3	33,5	95,9	39,7	44	47,3	52,5	56,6	6,79	9'5'
	1		1			6,2	8'6	12,2	13,9	16,1	18	19,1	21,5	23,4	26,3	28,6	32,2	36,2	39,4	44,3	48,2	58,5	65,5
	Wiederkehrzeit T _n [a]	Kategorie	Starkregenindex SRI [-]	Erhöhungsfaktor [-]	Dauerstufe D	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	2 h	3 h	4 h	6 h	9 h	12 h	18 h	1.0	2 d	3 d

SRI-Matrizen der KOSTRA-Raster 87028, 88027, 88028, 89027 und 89028

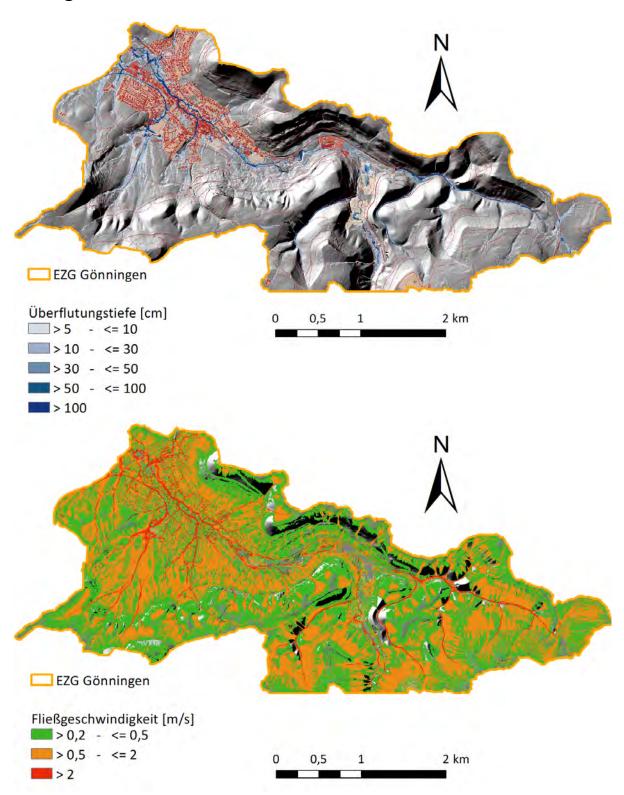
Anhang Abbildung 4



Anhang Abbildung 5 Für das Ereignis am 09. – 10. August 2015 für jede Dauerstufe ermittelte SRI aller 12 Nd.-Stationen

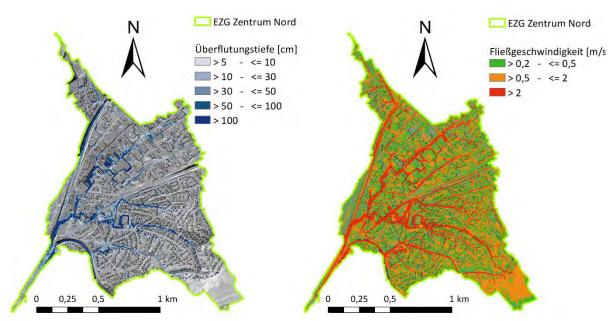


Anhang Abbildung 6 Für das Ereignis am 06. – 07. Juni 2018 für jede Dauerstufe ermittelte SRI aller 12 Nd.-Stationen

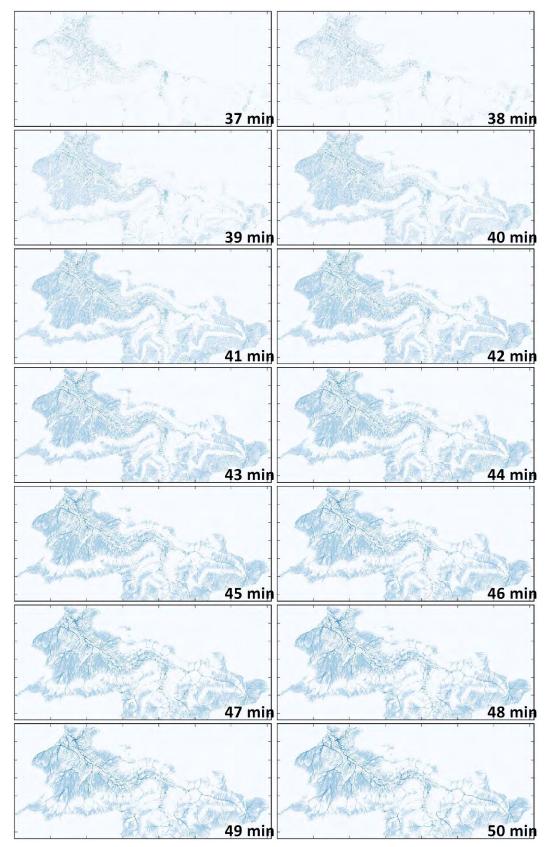


Anhang Abbildung 7

Räumlich differenzierte Darstellung der über das Ereignis 2016 hinweg maximal aufgetretenen Überflutungstiefen (oben) und Fließgeschwindigkeiten (unten) in EZG GOE für die aus Station 11 gebildete Gebiesniederschlagsbelastung



Anhang Abbildung 8 Räumlich differenzierte Darstellung der über das Ereignis 2016 hinweg maximal aufgetretenen Überflutungstiefen (links) und Fließgeschwindigkeiten (rechts) in EZG NO für die aus Station 11 gebildete Gebiesniederschlagsbelastung



Anhang Abbildung 9 Automatisch von RoGeR erstellte Grafiken der maximalen Wasserstände im Lauf der Ereignismodellierung pro Zeitschritt im EZG GOE für Szenario Nd. S11 2016 (Ausschnitt der modellierten Zeitschritte von Minute 37 bis 50)

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung	Einheit
BK50	Bodenkarte von Baden-Württemberg 1:50.000	
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung	
NdStation	Bodenniederschlagsmessstation	
DWD	Deutscher Wetterdienst	
EZG	Einzugsgebiet	
EZG ACH	Einzugsgebiet Zentrum Achalm	
EZG NO	Einzugsgebiet Zentrum Nord	
EZG GOE	Einzugsgebiet Gönningen	
FG	Fließgeschwindigkeit	m/s
GWL	Großwetterlage	-
HOA	Hortonscher Oberflächenabfluss	-
HGK50	Hydrogeologische Karte von Baden-Württemberg 1:50.000	m/s
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg	
LK	Luftkapazität	
nFK	Nutzbare Feldkapazität	
OAK	Oberflächenabflusskennwerte	
D	Dauerstufe	min
h_n	Regenhöhe	mm
SFA	Sättigungsflächenabfluss	
SER	Stadtentwässerung Reutlingen	
SRGK	Starkregengefahrenkarte	
SRI	Starkregenindex	
ÜT	Überflutungstiefe	cm
WaBoA	Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg	
O.L.	Wetterstation "Oberer Lindenhof"	
U.L.	Wetterstation "Unterer Lindenhof"	
T_n	Wiederkehrintervall / Wiederkehrzeit	a
ZA	Zwischenabfluss	

Erklärung

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

Ort, Datum Unterschrift

Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung, Mit 41 Abbildungen, 103 Tabellen und 31 Listen. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart.
- Apel, H., Martínez Trepat, O., Hung, N.N., Chinh, D.T., Merz, B., Dung, N.V., 2016. Combined fluvial and pluvial urban flood hazard analysis: concept development and application to Can Tho city, Mekong Delta, Vietnam. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 16 (4), 941–961, doi: 10.5194/nhess-16-941-2016.
- Apel, H., Merz, B., Thieken, A.H., 2008. Quantification of uncertainties in flood risk assessments. International Journal of River Basin Management 6 (2), 149–162, doi: 10.1080/15715124.2008.9635344.
 - https://www.researchgate.net/publication/228668281_Quantification_of_uncertainties_in_flood_ris k_assessment. Letzter Zugriff: 15.10.2019.
- Apel, H., Thieken, A.H., Merz, B., Blöschl, G., 2004. Flood risk assessment and associated uncertainty. Natural Hazards and Earth System Sciences (4), 295–308. https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/4/295/2004/nhess-4-295-2004.pdf. Letzter Zugriff: 15.10.2019.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (STMUV), 2019. Integrale Konzepte zum kommunalen Sturzflut-Risikomanagement, Infoblatt zum Sonderprogramm nach Nr. 2.4 RZWas 2018, Stand 17.09.2019.
 - https://www.stmuv.bayern.de/themen/wasserwirtschaft/foerderung/doc/infoblatt_sonderprogramm_sturzfluten.pdf. Letzter Zugriff: 11.10.2019.
- Becker, 2016. Pressekonferenzrede des Präsidenten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) Udo Gärtner, Berlin. https://www.dwd.de/DE/presse/pressekonferenzen/DE/2016/PK_08_03_2016/rede_becker.pdf?__b
- Becker, P., Becker, A., Dalelane, C., Deutschländer, T., Junghänel, T., Walter, A., 2016. Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland, Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung.
- Berg, P., Moseley, C., Haerter, J.O., 2013. Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. Nature Geosci 6 (3), 181–185, doi: 10.1038/ngeo1731.
- Bernhart, C., Albrecht, A.-M., 2018. Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Wasserwirtschaft 108 (11), 26–31.

lob=publicationFile&v=10. Letzter Zugriff: 06.10.2019.

- Beven, K.J., 2012. Rainfall-runoff modelling, The primer. Wiley-Blackwell, Chichester West Sussex, Hoboken NJ.
- Brasseur, G.P., Jacob, D., Schuck-Zöller, S., 2017. Klimawandel in Deutschland. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Bremicker, M., 2000. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM, Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i.Br. (Band 11).
- Bronstert, A., Agarwal, A., Boessenkool, B., Fischer, M., Heistermann, M., Köhn-Reich, L., Moran, T., Wendi, D., 2017. Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 Entstehung, Ablauf und Schäden eines "Jahrhundertereignisses". : Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse,

- Hydrologie und Wasserbewirtschaftung / BfG Jahrgang: 61.2017,3 ISSN 1439-1783. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWa) 61 (3), doi: 10.5675/HYWA 2017,3 1.
- Buchmann, K., 2016. Unwetter in Reutlingen Hohbuch 24.06.2016. https://www.youtube.com/watch?v=wE0iyiYp6_g. Letzter Zugriff: 23.10.2019.
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2011. Verwaltungsgrenzen Deutschland. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), Frankfurt am Main. https://www.arcgis.com/home/item.html?id=ae25571c60d94ce5b7fcbf74e27c00e0. Letzter Zugriff: 30.08.2019.
- Campbell Scientific Ltd., 2018. CS650 and CS655 Water Content Reflectometers, Instruction Manual. Campbell Scientific Ltd., Shepshed, Loughborough, LE12 9GX, UK. https://s.campbellsci.com/documents/eu/manuals/cs650 655.pdf. Letzter Zugriff: 17.07.2019.
- Casper, M., 2002. Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald), Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe.
- Deutscher Wetterdienst (DWD), 2016a. Nationaler Klimareport 2016, Klima Gestern, heute und in der Zukunft, Offenbach am Main.
- Deutscher Wetterdienst (DWD), 2016b. Großwetterlage, Juni 2016. https://www.dwd.de/DE/leistungen/grosswetterlage/2016/gwl_juni.pdf?__blob=publicationFile&v =7. Letzter Zugriff: 09.10.2019.
- Deutscher Wetterdienst (DWD), 2018a. RADOLAN-Kurzbeschreibung, Stand: April 2018. Deutscher Wetterdienst (DWD).
- Deutscher Wetterdienst (DWD), 2018b. Großwetterlage, Juni 2018. https://www.dwd.de/DE/leistungen/grosswetterlage/2018/gwl_juni.pdf?__blob=publicationFile&v =3. Letzter Zugriff: 09.10.2019.
- Deutscher Wetterdienst (DWD), 2019a. KOSTRA-DWD-2010R, Datenquelle:. ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/return_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA_DWD_2010R/. Letzter Zugriff: 24.06.2019.
- Deutscher Wetterdienst (DWD), 2019b. Starkregen. https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html. Letzter Zugriff: 21.10.2019.
- Deutscher Wetterdienst (DWD), 2019c. Wetterradarverbund. https://www.dwd.de/EN/research/weatherforecasting/num_modelling/bilder/02_datenassimilation_abb09_en.html?nn=17786. Letzter Zugriff: 20.10.2019.
- Deutscher Wetterdienst (DWD), 2019d. Unwetterklimatologie: Starkregen. https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/starkregen/starkregen_node.html. Letzter Zugriff: 24.06.2019.
- Devia, G.K., Ganasri, B.P., Dwarakish, G.S., 2015. A Review on Hydrological Models. Aquatic Procedia 4, 1001–1007, doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.126.
- Disse und Kaiser, 2018. Starkregen und Sturzfluten Erfassen, Erforschen, Evaluieren, Beiträge zum Seminar am 6. Juni 2018 an der Technischen Universität München. ISBN: 9783887216658.
- Dormann, C.F., 2013. Parametrische Statistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Dosch, F., 2015. Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung, Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitze Städte; Ergebnisbericht der fallstudiengestützten Expertise "Klimaanpassungsstrategien zur

- Überflutungsvorsorge verschiedener Siedlungstypen als kommunale Gemeinschaftsaufgabe"; ein Projekt des Forschungsprogramms "Experimenteller Wohnungs- und Städtebau" (ExWoSt) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), betreut vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Bundesinst. für Bau- Stadt- und Raumforschung, Bonn.
- DWD, 2019e. Zahlen und Fakten zum Deutschen Wetterdienst 2019. https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/allgemein/zahlen_und_fakten.pdf?__blob=publica tionFile&v=12. Letzter Zugriff: 24.09.2019.
- Fischer, S., Schumann, A., 2018. Berücksichtigung von Starkregen in der Niederschlagsstatistik, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung / BfG Jahrgang: 62.2018,4 ISSN 1439-1783. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWa) 62 (4), doi: 10.5675/HYWA_2018,4_2.
- Fohrer et al., 2016. Hydrologie. ISBN: 978-3-8252-4513-9.
- Gilli, S., 2019. Hydraulische Berechnung. https://www.sieker.de/fachinformationen/hochwasser/hydraulische-berechnung.html. Letzter Zugriff: 16.10.2019.
- Grillakis, M.G., Koutroulis, A.G., Komma, J., Tsanis, I.K., Wagner, W., Blöschl, G., 2016. Initial soil moisture effects on flash flood generation A comparison between basins of contrasting hydroclimatic conditions. Journal of Hydrology 541, 206–217, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.007.
- Grisa, T.M., 2013. Relabeling Extreme Rainfall Events so the Public Understands Their Severity. In: Water Environment Federation (Hrsg.), Proceedings of the Water Environment Federation. WEFTEC 2013: Session 10 through Session 19, Alexandria, VA, 1335–1345.
- Grisa, T.M., 2014. Relabeling Extreme Rainfall Events To Improve Public Understanding. https://stormwater.wef.org/2014/01/relabeling-extreme-rainfall-events-improve-public-understanding/. Letzter Zugriff: 17.04.2019.
- Günthert, W., Faltermaier, S., Schneider, B., 2018. Starkregen Urbane Sturzfluten 4.0, Fortschreibung der Studie Niederschlagswasser vom Mai 2016. https://www.bdb-bfh.de/meldungsdetails/urbane-sturzfluten-4-0.html. Letzter Zugriff: 12.10.2019.
- Guse, B., Pilz, T., Stoelzle, M., Bormann, H., 2019. Charakterisierung und Analyse hydrologischer Modelle im deutschsprachigen Raum. Wasser Abfall 21 (5), 43–52. http://www.hydro.uni-freiburg.de/publ/pubpics/guse 2019. Letzter Zugriff: 10.10.2019.
- Hamburg Wasser, 2019. Starkregenkarte für Hamburg, Online-Anwendung gibt Aufschluss über die Stärke der Niederschläge. https://www.hamburgwasser.de/privatkunden/themen/starkregen/. Letzter Zugriff: 23.10.2019.
- Hölting, B., Coldewey, W.G., 2013. Hydrogeologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- 2006. Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. DWA, Dt. Vereinigung f. Wasserwirtschaft, Abwasser u. Abfall, Hennef.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019. Climate Change and Land, An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, Summary for Policymakers. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/Fullreport-1.pdf. Letzter Zugriff: 25.09.2019.
- 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), 1780–1789, doi: 10.1016/j.advwatres.2005.12.011.

- Junghänel, T., Ertel, H., Deutschländer, T., 2017. KOSTRA-DWD-2010R, Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010. Deutscher Wetterdienst (DWD), Abteilung Hydrometeorologie, Offenbach am Main.
- Kachelmann GmbH, 2019. Kachelmannwetter. https://kachelmannwetter.com/de. Letzter Zugriff: 10.10.2019.
- Kaiser, M., Winter, F., Rieger, W., 2017. Prozessbasierte Modellierung der Oberflächenabflussbildung und -konzentration in einem kleinen voralpinen Einzugsgebiet. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWa) 61 (5), 327–337. http://www.hywa-online.de/prozessbasiertemodellierung-der-oberflaechenabflussbildung-und-konzentration-in-einem-kleinen-voralpinen-einzugsgebiet/. Letzter Zugriff: 25.09.2019.
- Kokkonen, T., Koivusalo, H., Karvonen, T., 2001. A semi-distributed approach to rainfall-runoff modelling a case study in a snow affecte catchment. Environmental Modelling & Software 16, 481–493, doi: 10.1016/S1364-8152(01)00028-7.
- Kron, W., 2017. Überschwemmungsrisiko: Steigt es, fällt es, bleit es konstant? In: M. Casper, O. Gronz, R. Ley, T. Schütz (Hrsgg.), Den Wandel messen Wie gehen wir mit Nichtstationarität in der Hydrologie um? Beiträge zum Tag der Hydrologie am 23./24. März 2017 an der Universität Trier. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V, Hennef, 11–20.
- Krüger, M., Pfister, A., 2016. Anwendung von Starkregenindex-Verfahren zur Unterstützung der Risikokommunikation in der Emscher-Lippe-Region. Korrespondenz Wasserwirtschaft 9 (7), 412–419.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 2018. LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement, Erfurt.
- Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL), 2019. Digitales Geländemodell (DGM). https://www.lgl-bw.de/lgl-internet/opencms/de/05_Geoinformation/Geotopographie/Digitale_Gelaendemodelle/. Letzter Zugriff: 27.09.2019.
- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB), 2015. Hydrogeologische Karte von Baden-Württemberg 1:50 000 (HGK 50). Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB).
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW), 2010. Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS) Veränderung in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter Ereignisse und Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit, Abschlussbericht. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW), Aachen, Lübeck, Hattingen.
- Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), 2019a. Allgemeine Informationen zu den Messwerten der Wetterstationen. https://www.wetter-bw.de/Internet/AM/inetcntrBW.nsf/cuhome.xsp?src=0DNGMSGM8D&p1=9T84J05V4X&p3=0SUH35YG92&p4=EZ5D5ZTI3K. Letzter Zugriff: 17.07.2019.
- Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), 2019b. Wetterstationsmessdaten, Datenquelle:. https://www.wetter-bw.de/Internet/AM/inetcntrBw.nsf/cuhome.xsp?src=4JHVFJGNW4&p1=535TN12L42&p3=I2O8 V87CCH&p4=EZ5D5ZTI3K. Letzter Zugriff: 10.07.2019.

- LARSIM-Entwicklergemeinschaft (LEG), 2019. Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM, Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, Stand: 08.08.2019. http://www.larsim.de/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf. Letzter Zugriff: 14.10.2019.
- Lehmann, J., Coumou, D., Frieler, K., 2015. Increased record-breaking precipitation events under global warming. Climatic Change 132 (4), 501–515, doi: 10.1007/s10584-015-1434-y. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10584-015-1434-y.pdf. Letzter Zugriff: 28.03.2019.
- Leistert, H., 2019. 2D-hydraulische Modellierung mit RoGeR, Telefonat, Freiburg im Breisgau.
- 2018. Leitfaden Starkregen, Objektschutz und bauliche Vorsorge : Bürgerbroschüre. Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung, Bonn.
- LfU, 2008. Hochwasser im Spiegel der Zeit Leben mit dem Fluss, Augsburg. http://docs.dpaq.de/3979-umweltbasis hochwasser.pdf. Letzter Zugriff: 23.10.2019.
- Lo, S.-W., Wu, J.-H., Lin, F.-P., Hsu, C.-H., 2015. Visual Sensing for Urban Flood Monitoring. Sensors (Basel, Switzerland) 15 (8), 20006–20029, doi: 10.3390/s150820006.
- Loat, R., Petrascheck, A., 2001. Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten, Empfehlungen 1997, Biel. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/publikationen-studien/publikationen/beruecksichtigung-hochwassergefahren-raumwirksamen-taetigkeiten.html. Letzter Zugriff: 27.09.2019.
- LUBW, 2016. Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umwelt Messungen und Naturschutz (LUBW), Karlsruhe. ISBN: 9783882513912.
- Malitz, G., 2005. KOSTRA-DWD-2000, Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2000), Grundlagenbericht. Deutscher Wetterdienst (DWD), Abteilung Hydrometeorologie, Offenbach am Main.
- Malitz, G., Ertel, H., 2015. KOSTRA-DWD-2010, Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 bis 2010), Abschlussbericht. Deutscher Wetterdienst (DWD), Abteilung Hydrometeorologie, Offenbach am Main.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., Gaume, E., 2010. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. Journal of Hydrology 394 (1-2), 118–133, doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.017.
- Maurer, T., 1997. Physikalisch begründete, zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten, Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe.
- Mein, R.G., Larson, C.L., 1973. Modeling infiltration during a steady rain. Water Resour. Res. 9 (2).
- 2016. Merkblatt DWA-M 119, Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen, DWA-Regelwerk.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM), 2019. Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg, Von der Starkregengefahrenkarte zum kommunalen Handlungskonzept, Stand 06.05.2019.
- Mudersbach, C., 2016. Ableitung eines Starkregenindex in Abhängigkeit von Jährlichkeit und Regendauer, Bochum.

- Mudersbach, C., Krüger, M., Pfister, A., Netzel, F., 2017. Starkregenindizes: Geeignete Instrumente für die Risikokommunikation in Zeiten des hydrologischen Wandels? In: M. Casper, O. Gronz, R. Ley, T. Schütz (Hrsgg.), Den Wandel messen Wie gehen wir mit Nichtstationarität in der Hydrologie um? Beiträge zum Tag der Hydrologie am 23./24. März 2017 an der Universität Trier. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V, Hennef.
- Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV), 2018. Arbeitshilfe kommunales Starkregenrisikomanagement, Hochwasserrisikomanagementplanung in NRW, Stand: November 2018. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV). https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/arbeitshilfe_kommunales_starkregenrisik omanagement 2018.pdf. Letzter Zugriff: 17.09.2019.
- Nuswantoro, R., Diermanse, F., Molkenthin, F., 2016. Probabilistic flood hazard maps for Jakarta derived from a stochastic rain-storm generator. J Flood Risk Management 9 (2), 105–124, doi: 10.1111/jfr3.12114.
- OTT HydroMet GmbH, 2019a. Niederschlagssensor OTT Pluvio², Betriebsanleitung. https://www.ott.com/de-ch/produkte/download/betriebsanleitung-niederschlagssensor-ott-pluvio²/. Letzter Zugriff: 25.06.2019.
- OTT HydroMet GmbH, 2019b. Stadtentwässerung Reutlingen Niederschlagsmessnetz mit 12 OTT Pluvio². https://www.ott.com/fileadmin/ott.com/media/04_projects/SER-Reutligen/AppliNotes SER Reutlingen de.pdf. Letzter Zugriff: 25.06.2019.
- 2017. Praxisleitfaden, Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen.
- Professur für Hydrologie, o.J.a. Beschreibung zur Ableitung der Eingangsdatensätze für RoGeR, Freiburg im Breisgau.
- Professur für Hydrologie, o.J.b. Eingangsparameter für RoGeR, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.
- Professur für Hydrologie, 2017. Handbuch RoGeR_WHM / urbanRoGeR v.7, Anleitung für die Anwendung des Modells RoGeR_WHM / urbanRoGeR (Runoff Generation Research Model Wasserhaushaltsmodell Version 7)., Bearbeitungsstand 22. 11. 2017, Freiburg im Breisgau.
- Professur für Hydrologie, 2019. Niederschlag-Abflussmodell RoGeR. http://www.hydrology.unifreiburg.de/roger/.
- Schaffitel, A., Schuetz, T., Weiler, M., 2017. Untersuchungen zum Infiltrationsverhalten verschiedener teilversiegelter urbaner Flächenbeläge. In: M. Casper, O. Gronz, R. Ley, T. Schütz (Hrsgg.), Den Wandel messen Wie gehen wir mit Nichtstationarität in der Hydrologie um? Beiträge zum Tag der Hydrologie am 23./24. März 2017 an der Universität Trier. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V, Hennef, 75–86.
- Scherrer, S., 1997. Abflussbildung bei Starkniederschlägen, Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Hydrologie und Glaziologie; ETH Zürich.
- Scherrer, S., 2006. Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. https://www.edoweb-rlp.de/resource/edoweb%3A3351868. Letzter Zugriff: 24.10.2019.
- Schmid, A., Hahn, F., Renz, M., 2009. Wasserkraftnutzung in der Region Neckar-Alb, Wiesaz. Regionalverband Neckar-Alb. https://www.rvna.de/site/Regionalverband+Neckar+Alb/get/documents E1234526315/rv-

- neckaralb/RVNA_Dateien/Materialien/Wasserkraft/Wasserkraft2011_Wiesaz_RVNA.pdf. Letzter Zugriff: 09.10.2019.
- Schmitt, T.G., 2014. Starkregenindex zur Kommunikation von Überflutungsursachen und Risiken. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 61 (8), 681-687.
- Schmitt, T.G., 2015. Weiterentwicklung des Starkregenindex zur Verwendung in der kommunalen Überflutungsvorsorge. gwf Wasser | Abwasser (07-08), 774-781%V 156. http://ojs.diverlag.de/index.php/gwf wa/article/view/1592.
- Schmitt, T.G., 2016. Ortsbezogene Regenhöhen im Starkregenindexkonzept SRI12 zum Anwendungskontext Risikokommunikation in DWA-M 119. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft (11), 689–691.
- Schmitt, T.G., 2017. Ortsbezogene Regenhöhen im Starkregenindexkonzept SRI12 zur Risikokommunikation in der kommunalen Überflutungsvorsorge. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 64 (4), 294–300.
- Schmitt, T.G., Krüger, M., Pfister, A., Becker, M., Mudersbach, C., Fuchs, L., Hoppe, H., Lakes, I., 2018. Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 11 (2), 82, doi: 10.3243/kwe2018.02.001.
- Schönwiese, C.-D., 2008. Extremereignisse aus meteorologisch-statistischer Sicht. promet 34 (1/2), 61–65.
- Schulla, J., 1997. Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen, Dissertation, ETH Zürich, Zürich.
- Simperler, L., Kretschmer, F., Ertl, T., 2019. A methodical framework for analysing the cause of urban pluvial flooding in a hillside settlement. Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research 79 (9), 1798–1807, doi: 10.2166/wst.2019.181.
- Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Muche, M., Avant, B., 2017. An Overview of Rainfall-Runoff Model Types. United States Environmental Protection Agency (EPA). Letzter Zugriff: 25.09.2019.
- Smith, G., McLuckie, D., 2015. Delineating hazardous flood conditions to people and property. https://knowledge.aidr.org.au/media/5662/delineating-hazardous-flood-conditions-smith-mcluckie.pdf. Letzter Zugriff: 27.09.2019.
- Smith, G.P., Davey, E.K., Cox, R.J., 2014. Flood Hazard, WRL Technical Report 2014/07. Water Research Laboratory.
- Stadt Reutlingen, 2019. Shapefile der 12 Niederschlagsmessstationen. Stadt Reutlingen.
- 2012. Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer. DWA, Dt. Vereinigung f. Wasserwirtschaft, Abwasser u. Abfall, Hennef.
- Stein, K., Förster, K., Riedel, G., Meon, G., 2009. Untersuchung starkregengefährdeter Gebiete, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt. TU-Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz.
- Steinbrich, A., Leistert, H., Weiler, M., 2016a. Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. Environ Earth Sci 75 (21), 165, doi: 10.1007/s12665-016-6234-9.

- Steinbrich, A., Leistert, H., Weiler, M., 2018. Forschungsprojekt zur Generierung von einheitlichen Datengrundlagen für die hydraulische Modellierung von Starkregenereignissen, Projektphase 2, Zwischenbericht für die LUBW zu den im Werkvertrag vereinbarten Leistungen.
- Steinbrich, A., Stölzle, M., Weiler, M., 2016b. Generierung von konsistenten Grundlagendaten zur Berechnung von Starkregenereignissen für eine Starkregengefahrenkartierung in BW, Absschlussbericht für die LUBW zu den im Werkvertrag vereinbarten Leistungen.
- Steinbrich, A., Weiler, M., 2012a. Abflussbildung und Abflusskomponenten, (Atlastafel 6.5). In: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM), Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (Hrsgg.), Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg.
- Steinbrich, A., Weiler, M., 2012b. Direktabflusshöhe: Hunderjährliches Niederschlagsereignis, (Atlastafel 6.7). In: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM), Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (Hrsgg.), Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg.
- Steinbrich, A., Weiler, M., 2012c. Einzugsgebietsbezogene Abflussbildung, (Atlastafel 6.6). In: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM), Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (Hrsgg.), Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg.
- Steinbrich, A., Weiler, M., 2019. Forschungsprojekt Erarbeitung einer hochaufgelösten Karte der Oberflächenversiegelung in Baden-Württemberg, Entwurf, Unveröffentlicht, Freiburg im Breisgau.
- Steinbrich, A., Weiler, M., Leistert, H., 2015. Alles RoGeR? Modellierung von Sturzfluten aufgrund von Starkniederschlägen. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung.
- Stoelzle, M., Steinbrich, A., Weiler, M., 2016. Starkregengefährdung in Baden-Württemberg von der Methodenentwicklung zur Starkregenkartierung. In: G. Warnecke, A.-D. Ebner von Eschenbach, Y. Strunck, L. Kirschbauer, A. Müller (Hrsgg.), Wasserressourcen. Wissen in Flussgebieten vernetzen: Beiträge zum Tag der Hydrologie am 17./18. März 2016 in Koblenz, ausgerichtet von der Hochschule Koblenz und der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Hydrologische Wissenschaften Fachgemeinschaft in der DWA, Hennef.
- United Nations (UN), 2019. World Urbanization Prospects 2018, Highlights. Department of Economic and Social Affairs; Population Division; United Nations, New York. https://population.un.org/wup/Publications/. Letzter Zugriff: 08.10.2019.
- Verworn, H.-R., Draschoff, R., 2008. PEN-Erweiterung Untersuchungen und Datenanalysen für ein Verfahren zur Ermittlung von extremen Starkniederschlagshöhen kurzer Dauerstufen auf der Grundlage von KOSTRA-DWD 2000 und PEN-LAWA 2005, Ein F+E Vorhaben im Auftrag der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Hannover. https://www.yumpu.com/de/document/read/13480838/erweiterungsbericht/3. Letzter Zugriff: 04.04.2019.
- Villinger, E., 1997. Der Oberjura-Aquifer der Schwäbischen Alb und des baden-württembergischen Molassebeckens (SW-Deutschland). In: M. Herbert, G. Teutsch (Hrsgg.), Aquifersysteme Südwestdeutschlands. Eine Vorlesungsreihe an der Universität Tübingen, 77–108.
- WG, 2013. Wassergesetz für Baden-Württemberg vom 03.12.2013 in der Fassung vom 28.11.2018. http://www.landesrecht-bw.de/jportal/?quelle=jlink&query=WasG+BW+Inhaltsverzeichnis&psml=bsbawueprod.psml&max=true. Letzter Zugriff: 11.10.2019.

- WHG, 2009. Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBI. I S. 2585) das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 04.12.2018 (BGBI. I S. 2254) geändert worden ist. https://www.gesetze-iminternet.de/whg 2009/. Letzter Zugriff: 11.10.2019.
- Weiler, M., Flühler, H., 2004. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. Geoderma 120 (1-2), 137–153, doi: 10.1016/j.geoderma.2003.08.014.
- Wessolek, G., Kaupenjohann, M., Renger, M., 2009. Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Fachgebiete Bodenkunde/Standortkunde und Bodenschutz, Institut für Ökologie, Technische Universität Berlin, Berlin.
- Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Walawender, E., Weigl, E., Becker, A., 2018. Neue radarbasierte Produkte des DWD zum präventiven Starkregenrisikomanagement in Deutschland. In: M. Disse, M. Kaiser (Hrsgg.), Starkregen und Sturzfluten Erfassen, Erforschen, Evaluieren. Beiträge zum Seminar am 6. Juni 2018 an der Technischen Universität München, 11–20.
- WMO, 1994. GUIDE TO HYDROLOGICAL PRACTICES.
- Ziese, M., Junghänel, T., Becker, A., 2016. Andauernde Großwetterlage Tief Mitteleuropa entfaltet Ihr Unwetterpotential mit starken Gewittern und massiven Schadensgeschehen in Deutschland, Stand: 03.06.2016. Deutscher Wetterdienst (DWD). https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20160603_starkregen_mai-2016_meldung.pdf?__blob=publicationFile&v=3. Letzter Zugriff: 12.10.2019.

Quelle Titelbild: Eigens mit RoGeR und ArcGIS erstellte SRGK, SRI-Grafik (Schmitt et al., 2018)