## Professur für Hydrologie

der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Kathrin Szillat

# Starkregenmodellierungen und -analysen in verschiedenen Gebieten der Stadt Freiburg

Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler Freiburg i. Br., Juni 2022

## Professur für Hydrologie

der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

#### Kathrin Szillat

# Starkregenmodellierungen und -analysen in verschiedenen Gebieten der Stadt Freiburg

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler

Korreferent: Prof. Dr. Kerstin Stahl

Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler Freiburg i. Br., Juni 2022

# I Inhaltverzeichnis

II Verzeichnis der Abbildungen im Text	III
III Verzeichnis der Tabellen im Text	V
IV Verzeichnis der Abbildungen im Anhang	VI
V Verzeichnis der Tabellen im Anhang	VI
Zusammenfassung	VII
1. Einleitung	1
1.1 Stand der Forschung	2
1.1.1 Abflussbildungsprozesse	2
1.1.2 Modellierung von Sturzfluten	4
2. Problemstellung und Zielsetzung	8
3. Methoden und Vorgehensweise	10
3.1 Das Niederschlags-Abfluss-Modell RoGeR	10
3.1.1 Modellvorstellung	10
3.1.2 Parametrisierung	12
3.1.3 Anwendung	20
3.2 Auswahl der Stadtgebiete	20
3.3 Ortsbegehung	21
3.4 Kanalisation	21
3.5 100-jähriges Niederschlagsereignis	24
3.6 Sensitivitätsanalyse	26
3.7 Modellevaluierung	27
4. Ergebnisse	29
4.1 Auswahl der Stadtgebiete	29
4.2 Beschreibung der Einzugsgebiete	30
4.3 Beschreibung des Starkregenereignisses	37
4.4 Ausgangsmodellierung	38
4.5 Kanalisation	40
4.6 100-jähriges Niederschlagsereignis	50
4.7 Sensitivitätsanalyse	53
4.8 Modellevaluierung	59

5. Diskussion	70
6. Schlussfolgerungen	75
Anhang	81
Liste der verwendeten Akürzungen	84
Ehrenwörtliche Erklärung	86

# II Verzeichnis der Abbildungen im Text

Abbildung 1: Die im N-A-moden RoGek implementerten Abhussbildungs- und immtationsprozesse (LUBW, 2010b) 11
Abbildung 2: Ableitung der Fließgeschwindigkeiten für den schnellen Zwischenabfluss in RoGeR (Steinbrich et al., 2016) 17
Abbildung 3: 100-jähriges Niederschlagsereignis in der Dauerstufe 165 Minuten mit einer anfangs-, mitten- und endbetonten
Intensitätsverteilung und die 5-Minuten-Niederschlagsdaten des zu untersuchenden Starkregenereignisses
Abbildung 4: Feuerwehreinsätze am 25.06.2016
Abbildung 5: Einzugsgebiete (EZG) der Stadtteile Freiburg-Hochdorf und Benzhausen und bekannte Schadstellen vom
25.06.2016
Abbildung 6: Hangneigung (links) und Oberbodenarten (rechts) des Einzugsgebietes Freiburg-Hochdorf
Abbildung 7: Landnutzung (links) und Versiegelungsgrade (rechts) im Einzugsgebiet Freiburg-Hochdorf
Abbildung 8: Schadstellen in Freiburg-Hochdorf
Abbildung 9: Hangneigung (links) und Oberbodenart (rechts) des Einzugsgebiet Benzhausen
Abbildung 10: Landnutzung (links) und Versiegelungsgrad (rechts) des Einzugsgebiet Benzhausen
Abbildung 11: Schadstellen in Benzhausen
Abbildung 12: Verlauf des Starkregenereignis: (von links nach rechts) a) 22:25, b) 22:30, c) 22:35, d) 22:40, e) 22:45, f) 22:50
Abbildung 13: Simulierter Oberflächenabfluss (links) und gesamte Durchflussmengen (rechts) in Freiburg-Hochdorf 38
Abbildung 14: Simulierter Oberflächenabfluss (links) und gesamte Durchflussmenge (rechts) in Benzhausen
Abbildung 15: Lage der Einsatzorte, Kanalschächte, Straßeneinläufe und Kanalauslässe im Einzugsgebiet Freiburg-Hochdorf
Abbildung 16: Simulierte Abflussganglinie am Gebietsauslass in Freiburg-Hochdorf mit und ohne Berücksichtigung der
Kanalisation
Abbildung 17: Simulierte maximale Wasserstände an den Schadstellen in Freiburg-Hochdorf mit und ohne Berücksichtigung der Kanalisation
Abbildung 18: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Wasserstände der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf
zwischen der Ausgangsmodellierung und der Modellierung mit Berücksichtigung der Kanalisation
Abbildung 19: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Fließgeschwindigkeiten der Einsatzstellen in Freiburg-
Hochdorf zwischen der Ausgangsmodellierung und der Modellierung mit Berücksichtigung der Kanalisation
Abbildung 20: Simulierte maximale Fließgeschwindigkeiten an den Schadstellen in Freiburg-Hochdorf mit und ohne
Berücksichtigung der Kanalisation
Abbildung 21: Simulierte gesamte Durchflussmengen an den Schadstellen in Freiburg-Hochdorf mit und ohne
Berücksichtigung der Kanalisation
Abbildung 22: Absolute Abweichung der simulierten gesamten Durchflussmengen der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf
zwischen der Ausgangsmodellierung und der Modellierung mit Berücksichtigung der Kanalisation
Abbildung 23: Lage der Einsatzorte, Kanalschächte, Straßeneinläufe und Kanalauslässe im Einzugsgebiet Benzhausen 46
Abbildung 24: Simulierte maximale Wasserstände an den Schadstellen in Benzhausen mit und ohne Berücksichtigung der
Kanalisation
Abbildung 25: Simulierte Abflussganglinie am Gebietsauslass in Benzhausen mit und ohne Berücksichtigung der Kanalisation
47

Abbildung 26: Simulierte maximale Fließgeschwindigkeiten an den Schadstellen in Benzhausen mit und ohne
Berücksichtigung der Kanalisation
Abbildung 27: Simulierte gesamte Durchflussmengen an den Schadstellen in Benzhausen mit und ohne Berücksichtigung der
Kanalisation
Abbildung 28: Simulierte maximale Wasserstände an den Einsatzorten in Freiburg-Hochdorf beim 100-jährigen
Niederschlagsereignis mit verschiedenen Intensitätsverteilungen
Abbildung 29: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Wasserstände der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf
zwischen der Ausgangsmodellierung und den verschiedenen Intensitätsverteilungen des 100-jährigen N-Ereignisses 51
Abbildung 30: Absolute Abweichung der simulierten gesamten Durchflussmengen der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf
zwischen der Ausgangsmodellierung und den verschiedenen Intensitätsverteilungen des 100-jährigen N-Ereignisses 52
Abbildung 31: Absolute Abweichung der simulierten gesamten Durchflussmengen der Einsatzstellen in Benzhausen zwischen
der Ausgangsmodellierung und den verschiedenen Intensitätsverteilungen des 100-jährigen N-Ereignisses
Abbildung 32: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Wasserstände der Einsatzstellen in Benzhausen zwischen der
Ausgangsmodellierung und den verschiedenen Intensitätsverteilungen des 100-jährigen N-Ereignisses
Abbildung 33: Simulierte Abflussganglinie am Gebietsauslass Freiburg-Hochdorf mit veränderten Eingangsparametern 54
Abbildung 34: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Fließgeschwindigkeiten der Einsatzstellen in Freiburg-
Hochdorf zwischen der Ausgangsmodellierung und verändertem Niederschlagsinput
Abbildung 35: Absolute Abweichung der simulierten gesamten Durchflussmengen der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf
zwischen der Ausgangsmodellierung und verändertem Niederschlagsinput
Abbildung 36: Simulierte Abflussganglinie am Gebietsauslass Benzhausen mit veränderten Eingangsparametern 57
Abbildung 37: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Wasserstände der Einsatzstellen in Benzhausen zwischen der
Ausgangsmodellierung und verändertem Niederschlagsinput sowie zusätzlichen Änderungen der Bodenvorfeuchte 58
Abbildung 38: Absolute Abweichung der simulierten gesamten Durchflussmengen der Einsatzstellen in Benzhausen zwischen
der Ausgangsmodellierung und verändertem Niederschlagsinput sowie zusätzlichen Änderungen der Bodenvorfeuchte 59
Abbildung 39: Foto von Garageneinfahrt bei Einsatzort 8 (Quelle: Ortsverwaltung Freiburg-Hochdorf)
Abbildung 40: Simulierter Oberflächenabfluss an Einsatzort 8 und Umgebung
Abbildung 41: Fotos der Schadensfälle an Einsatzort 27 (Quelle: Anwohner)
Abbildung 42: Simulierter Oberflächenabfluss an Einsatzort 27 und Umgebung
Abbildung 43: Simulierter Oberflächenabfluss an Einsatzort 46
Abbildung 44: Simulierter gesamter Durchfluss an Einsatzort 20 und 21

# III Verzeichnis der Tabellen im Text

Tabelle 1: Für RoGeR erforderliche Eingangsparameter (verändert nach Steinbrich et al., 2021)
Tabelle 2: Datensätze und deren Verwendung in RoGeR (verändert nach Steinbrich et al., 2016)
Tabelle 3: Geometrische Daten der bei der Ortsbegehung aufgenommen Straßeneinläufe
Tabelle 4: Anzahl der Feuerwehreinsätze an verschiedenen Tagen der Jahre 2015 - 2021
Tabelle 5: Veränderung der maximalen Wasserstände, maximalen Fließgeschwindigkeiten und gesamten Durchflussmengen
durch die Berücksichtigung der Kanalisation an den Einsatzorten in Freiburg-Hochdorf
Tabelle 6: Veränderung der maximalen Wasserstände, maximalen Fließgeschwindigkeiten und gesamten Durchflussmengen
durch die Berücksichtigung der Kanalisation an den Einsatzorten in Benzhausen
Tabelle 7: Informationen zu den Schäden an den Einsatzorten und Ergebnisse der Starkregenmodellierung
Tabelle 8: Durchschnittliche maximale Wasserstände und gesamte Durchflussmengen in den Einzugsgebieten je nach
Starkregenmodellierung
Tabelle 9: Änderung der Anzahl der Einsatzorte in Freiburg-Hochdorf, die bestimmte maximale Wasserstände und gesamte
Durchflussmengen erreichen, im Vergleich mit den verschiedenen Starkregenmodellierungen
Tabelle 10: Änderung der Anzahl der Einsatzorte in Benzhausen, die bestimmte maximale Wasserstände und gesamte
Durchflussmengen erreichen, im Vergleich mit den verschiedenen Starkregenmodellierungen

# IV Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abbildung A. 1: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Wasserstände der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf
zwischen der Ausgangsmodellierung und veränderten Bodenvorfeuchtebedingungen
Abbildung A. 2: Absolute Abweichung der simulierten gesamten Durchflussmengen der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf
zwischen der Ausgangsmodellierung und veränderten Bodenvorfeuchtebedingungen
V Verzeichnis der Tabellen im Anhang
Tabelle A. 1: RoGeR-ID je Landnutzungsklasse (Professur für Hydrologie, o.J.)
Tabelle A. 2: Feinbodenklassen nach KA5 und Bodenart-ID für RoGeR
Tabelle A. 3: Makroporenausstattung für Landnutzungsklassen

### Zusammenfassung

Sturzfluten entstehen infolge von konvektiven Starkregenereignissen und können aufgrund ihrer zeitlichen und räumlichen Variabilität praktisch überall auftreten. So besteht eine hohe Schadensgefährdung nicht nur in Gewässernähe, sondern auch fernab von Gewässern. Da Starkregenereignisse häufig kleinräumig auftreten sind vor allem kleine Einzugsgebiete betroffen, die häufig keine langjährigen Abflusszeitreihen für die Kalibrierung von Niederschlags-Abflussmodellen aufweisen. Es gibt nur wenige unkalibrierte Niederschlags-Abflussmodelle gibt, weshalb an der Professur für Hydrologie Freiburg, das ereignisbasierte, räumlich verteilte Modell RoGeR (Runoff Generation Research Model) entwickelt wirde. Ziel dieser Arbeit ist mittels der neuesten Version von RoGeR Starkregenanalysen und -modellierungen in verschiedenen Stadtgebieten der Stadt Freiburg durchzuführen und die Ergebnisse anhand von Einsatzberichten der Feuerwehr, Fotomaterial, Augenzeugenberichten und Zeitungsartikeln zu evaluieren. Zudem werden die modellierten Oberflächenabflüsse und gesamten Durchflussmengen mit Hilfe von Abflussberechnungen mittels der Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler auf Plausibilität geprüft. Zusätzlich wird durch die Verwendung des 100-jährigen Bemessungsniederschlags und durch geänderte Niederschlags- und Bodenvorfeuchteeingangsdaten analysiert, wie die Untersuchungsgebiete auf andere Voraussetzungen reagieren würden. Die Ergebnisse der Starkregenmodellierungen zeigen, dass RoGeR anhand von Einsatzdaten der Feuerwehrdaten das räumliche Auftreten und die Fließwege des oberflächlich ablaufenden Wassers in beiden Untersuchungsgebieten korrekt abbilden kann. Der Vergleich der simulierten Oberflächenabflüsse mit dem mittels der Fließformel berechneten Abflüssen zeigt, dass die Modellierung plausible Ergebnisse liefert. Die Modellierung hat an allen aufgezeichneten Schadstellen ausreichend Oberflächenabfluss simuliert, sodass die aufgezeichneten Schäden damit erklärbar sind mit Ausnahme einer Schadstelle. Vor allem an Einsatzorten, die fernab der Hauptfließwege liegen, erscheinen die simulierten maximalen Wasserstände und gesamten Durchflussmengen tendenziell zu niedrig. Beide Einzugsgebiete reagieren stark auf eine Änderung der Niederschlagseingangsdaten, während veränderte Bodenvorfeuchtebedingungen keine nennenswerten Auswirkungen verursachen. Eine gesamtheitlich, zufriedenstellende Modellevaluierung ist ohne die Verfügbarkeit von belastbaren Messwerten und den hohen Unsicherheiten nicht möglich.

**Stichworte:** Starkniederschlag, Starkregenmodellierung, Sturzflut, Niederschlags-Abflussmodellierung, RoGeR, Abflussbildungsprozesse

## 1. Einleitung

Starkregenereignisse sind lokal begrenzte Niederschläge, die sich durch hohe Niederschlagsmengen und -intensitäten auszeichnen. Ihr Auftreten ist meist sowohl räumlich als auch zeitlich begrenzt. Starkregen entsteht durch eine stark vertikale Luftbewegung (Konvektion), bei der sich warme aufsteigende Luftmassen in zunehmender Höhe abkühlen. Dabei kondensiert der in der Luft enthaltene Wasserdampf, was latente Wärme freisetzt und den vertikalen Auftrieb verstärkt. Starkregen tritt häufig im Zusammenhang mit Gewittern auf und birgt ein hohes Schadenspotential. Starkniederschläge können zu schnell ansteigenden Wasserständen, Überflutungen, Bodenerosion oder Hangrutschungen führen (DWD, 2022). Starkniederschläge können darüber hinaus zu Sturzfluten führen, die durch plötzliche, stark ansteigende Wasserstände gekennzeichnet sind. Diese sind im Gegensatz zu fluviatilen Hochwassern nicht an Fließgewässer gebunden, sondern können überall auftreten. Dadurch gibt es keine örtliche Beschränkung für Schäden durch Starkniederschläge und es ist wichtig die gesamte Bevölkerung für diese Gefahr zu sensibilisieren.

In Baden-Württemberg haben viele lokale Starkrenereignisse der letzten Jahre gezeigt, dass abseits von großen Gewässern Überflutungsrisiken bestehen und hohe Schadenssummen auftreten können. Beispielsweise zeigen dies die Ereignisse im Killertal (2008), im Glemsgebiet (2010), in Bretten und Bonndorf (2015), in Biberach (2016) und in Braunsbach (2016) (LUBW, 2016).

Die stark eingeschränkte Vorhersagbarkeit lokaler Starkniederschläge, sowie die für Sturzfluten typischen, kurzen Reaktionszeiten zwischen dem Niederschlagsbeginn und dem Hochwasserscheitel von maximal sechs Stunden, begrenzen die Möglichkeit Betroffene frühzeitig zu warnen erheblich (Marchi et al., 2010; Borga et al., 2014; LUBW, 2016; Bronstert et al., 2017). Auch die Vorhersage und Abschätzung der Gefahren durch Sturzfluten ist nur kurzfristig möglich und mit großer Unsicherheit verbunden. Es gibt keine langjährigen Messreihen solcher Ereignisse, die für extremwertstatistische Analysen genutzt werden könnten oder um Niederschlags-Abflussmodelle (N-A-Modelle) zu kalibrieren (Steinbrich et al., 2015). An der Professur für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg wurde deshalb ein räumlich verteiltes N-A-Modell entwickelt, welches nicht kalibriert werden muss. Das Modell RoGeR (Runoff Generation Research Model) ist ein ereignisbasiertes Modell, mit dem die verschiedenen Abflussbildungsprozesse in der Fläche und deren Abflusskonzentration mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung simuliert werden können (Steinbrich et al., 2015, 2016a, 2016b, 2021).

Für Starkregenregen gibt es keine allgemeingültige Definition oder statistische Abgrenzung, da charakteristische Niederschlagsmengen von der jeweiligen Klimazone abhängen. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) spricht von starkem Regen ab einer Niederschlagshöhe von 10 mm in 60 Minuten bzw. einer Niederschlagshöhe von 1.7 mm in 10 Minuten (DWD, 2022). Eine Starkregenwetterwarnung erfolgt, wenn voraussichtlich folgende Schwellenwerte überschritten werden:

Markante Wetterwarnung: Niederschlagsmengen von 15 – 25 l/m² in 1 Stunde oder 20 – 35 l/m² in 6 Stunden

- Unwetterwarnung: Niederschlagsmengen von  $> 25 40 \text{ l/m}^2$  in 1 Stunde oder  $> 35 60 \text{ l/m}^2$  in 6 Stunden
- Warnung vor extremem Unwetter: Niederschlagsmengen von > 40 l/m² in 1 Stunde oder > 60 l/m² in 6 Stunden (DWD, 2022)

In Deutschland haben in den letzten Jahrzehnten Überschwemmungen durch Starkniederschläge hohe Sachschäden verursacht und zudem auch Menschenleben gefordert. Zwei Sturmtiefs im Mai und Juni 2016 haben beispielsweise zu rund 800 Millionen Euro versicherter Schäden geführt (GDV, 2017). Neben den hohen Wassermassen können vor allem die hohe Sedimentfracht, mitgerissene Bäume, Autos oder sonstiges Treibgut erhebliche Schäden in den Wohngebieten verursachen (Piroth, 2020). Nicht zu unterschätzen ist außerdem die Gefährdung durch kontaminiertes Wasser. Die Wasserverschmutzung durch ausgewaschene Pestizide, Abwasser, ausgelaufenes Heizöl, Farben, Lacke oder andere Giftstoffe kann sowohl zu ökologischen als auch gesundheitlichen Auswirkungen führen (Goderbauer-Marchner et al., 2015).

Die Starkregenanalyse und -modellierung ist aufgrund des hohen Schadpotentials von Starkregenereignissen von besonderer Bedeutung. Sowohl im Bereich der Forschung als auch im Bevölkerungsschutz besteht ein hohes Interesse Starkregenereignisse besser zu verstehen. Auf Grundlage dieser können Risikobewertungen durchgeführt werden und Notfallplanungen sowie Anpassungs- und präventive Schutzmaßnahmen entwickelt werden. Da Starkregenereignisse in Zukunft vermutlich noch stärker zunehmen werden, ist eine Anpassung an die veränderten Bedingungen zum langfristigen Schutz unumgänglich (LZN, o. J.).

In dieser Masterarbeit wird das von der Professur für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg entwickelte räumlich verteilte N-A-Modell verwendet, um eine Starkregenanalyse in verschiedenen Stadtgebieten der Stadt Freiburg durchzuführen. Anhand vorhandener Daten sollen die simulierten Ergebnisse mit den realen Begebenheiten verglichen werden und zusätzlich verschiedene Szenarien untersucht werden.

#### 1.1 Stand der Forschung

Für eine erfolgreiche Modellierung von Starkregenereignissen ist die Verwendung aktueller Erkenntnisse aus der prozessorientierten Abflussbildungsforschung unerlässlich (Weiler und Mcdonnel, 2004). Im Folgenden werden die aktuellen Erkenntnisse der prozessorientierten Abflussbildungsforschung sowie der Modellierung von Sturzfluten dargestellt.

#### 1.1.1 Abflussbildungsprozesse

Durch Niederschlagsereignisse werden Abflussbildungsprozesse ausgelöst, die je nach Niederschlagsund Hangeigenschaften gesteuert werden. Generell können vier konzeptuelle Vorstellungen der Abflussbildungsprozesse unterschiedenen werden (Scherrer, 1997; Bachmair und Weiler, 2011):

- Horton'scher Oberflächenabfluss
- Sättigungsflächenabfluss

- Zwischenabfluss
- Tiefenperkolation

Der Horton'sche Oberflächenabfluss, der Sättigungsabfluss und die schnelle Komponente des Zwischenabflusses werden als Direktabfluss bezeichnet. Der Anteil des Niederschlags, der das Grundwasser verzögert erreicht oder an der Erd- und Vegetationsfläche verdunstet, stellt den Gebietsrückhalt dar. Die langsame Komponente des Zwischenabflusses, die Tiefenperkolation und die Interzeption sind daran beteiligt (Bronstert, 2016).

#### Horton'scher Oberflächenabfluss

Der Horton'sche Oberflächenabfluss (HOA) bildet sich infolge eines Infiltrationsüberschusses, wenn die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität des Bodens übersteigt. Das überschüssige Wasser fließt daraufhin entlang der Oberfläche ab. Dieses Konzept wurde erstmals von Robert Horton in semi-ariden Gebieten der USA beobachtet und beschrieben (Horton, 1933). HOA entsteht vor allem auf Böden, die aufgrund ihrer Bodeneigenschaften oder anderer Begebenheiten die Infiltration hemmen. Unter anderem sind Oberflächenversiegelung, Bodenverdichtung oder Hydrophobie des Oberbodens Faktoren, die HOA begünstigen (Bachmair und Weiler, 2011). Bei hohen Niederschlagsintensitäten entsteht auf gering durchlässigen Böden absoluter HOA, während auf gut durchlässigen Böden oder bei geringeren Niederschlagsintensitäten zeitlich verzögerter HOA entsteht. Wird nur zu Beginn eines Niederschlagsereignisses die Infiltration gehemmt, die sich im Laufe des Ereignisses aufhebt, wird temporärer HOA gebildet. Beispielsweise stellt die Hydrophobie solch ein Infiltrationshemmnis dar, das im Laufe des Niederschlagsereignisses durch langsame Sättigung Infiltration zulässt und damit den HOA verringert (Scherrer, 1997; Scherrer et al., 2006).

#### Sättigungsflächenabfluss

Der Sättigungsflächenabfluss (SFA) bildet sich infolge eines Sättigungsüberschusses, wenn die Speicherkapazität eines Bodens erschöpft ist und kein Wasser mehr infiltrieren kann (Bachmair und Weiler, 2011). Die Bildung von SFA setzt eine hohe Infiltrationskapazität, eine geringe Speicherkapazität und ein geringes laterales Transportvermögen des Bodens voraus. Zudem ist die Entstehung der Abflusskomponente von der Bodenvorfeuchte und den präferentiellen Fließwegen abhängig. Scherrer et al. (2007) unterscheidet zwischen schnellem, zeitlich verzögertem und stark zeitlich verzögertem SFA. Eine hohe Bodenvorfeuchte begünstigt dabei die Bildung von schnellem SFA. Dieser Prozess ist vor allem in Gewässernähe oder Senken zu beobachten. Zeitlich verzögerter SFA bildet sich vor allem auf flachgründigen Böden, die über einer Stauschicht liegen und hohe Infiltrationsraten aufweisen. Auf gut durchlässigen Böden wird stark verzögerter SFA gebildet (Scherrer et al., 2007; Bachmair und Weiler, 2011).

#### Zwischenabfluss

Der Zwischenabfluss (ZA) stellt die komplexeste Abflusskomponente dar. Er beschreibt das laterale Fließen in gut drainierenden Schichten innerhalb des Bodenprofils, entlang der Grenzschicht zwischen

Boden und Grundgestein oder zwischen Mineralboden und organischen Auflage. Vor allem in humiden, steilen Gebieten mit durchlässigen Böden tritt ZA auf. Die Bildung von ZA ist an eine hohe Sättigung gut drainierender Bodenschichten über einer Stauschicht gebunden. Solch eine Stauschicht kann eine schlecht durchlässige Bodenschicht oder unverwittertes Grundgestein sein (Scherrer 1997; Bachmair und Weiler, 2011; Bronstert, 2016). ZA tritt in Form von langsamem lateralem Matrixfluss und/oder schnellem präferentiellem Fließen auf. Beim Matrixfluss fließt das Wasser hangparallel durch den Porenraum der Bodenmatrix, während es beim präferentiellen Fließen durch Makroporen, Erosionsröhren, Tiergänge oder Trockenrisse fließt. Die Bildung solcher präferentieller Fließwege ist an die biologische Aktivität der Flora und Fauna sowie Auswaschung von Feinmaterial gebunden (Scherrer et al., 2007; Bronstert, 2016). Es ist davon auszugehen, dass die präferentiellen Fließwege ein Netzwerk bilden, welches erst infolge von fortschreitender Sättigung zustande kommt (Graham et al., 2010; Sidle et al., 2001). ZA kann auch in grobkörnigen Bodenschichten mit einer hohen Porosität vorkommen, wie beispielsweise in Hangschutt, lockerem Moränenmaterial oder periglazialen Ablagerungen (Weiler et al., 2006). Ein Wiederaustritt des Wassers an die Oberfläche aufgrund morphologischer Gegebenheiten, wird als Rückfluss ("Return Flow") bezeichnet (Scherrer, 1997).

#### Tiefenperkolation

Die Tiefenperkolation (TP) beschreibt den vertikalen Transport von Wasser in tiefere Bodenschichten, wo es zwischengespeichert wird oder dem Grundwasser zufließt. Das Wasser, welches für die Tiefenperkolation zur Verfügung steht, stammt entweder aus der Bodenmatrix oder aus den präferentiellen Fließwegen. Für die TP wird eine hohe Infiltrationskapazität des Bodens und eine hohe Durchlässigkeit des Gesteins vorausgesetzt (Scherrer, 1997; Scherrer et al., 2007).

#### 1.1.2 Modellierung von Sturzfluten

Ein Modell ist ein vereinfachtes Abbild der Realität. In der Hydrologie werden Modelle als grundlegende Werkzeuge eingesetzt, um den Wasserkreislauf oder Teile davon auf unterschiedlichen Maßstabsebenen abzubilden. Dabei werden die Modellstruktur, verfügbare Eingangsdaten und Aufgabenstellungen aufeinander abgestimmt. Modelle können dazu beitragen komplexe Vorgänge besser nachvollziehbar zu machen, da es nicht möglich ist alle hydrologischen Prozesse und deren Zusammenhänge im Feld zu messen (Hörmann, 2016). Ebenfalls können anhand von Modellen Vorhersagen zu wasserwirtschaftlichen Maßnahmen getroffen werden, die vor allem im Bereich des Hochwasserschutzes, der Wassernutzung und der Gewährleistung der Wasserqualität und -quantität eine große Rolle spielen (Beven, 2012).

Um die Bevölkerung vor den Schäden durch Sturzfluten schützen zu können, werden mit Hilfe von Starkregenanalysen und -modellierungen präventive Maßnahmen entwickelt. Zur Hochwasserabschätzung werden aktuell drei Verfahren angewandt: Extremwertstatistik, regional-hydrologische Ansätze und N-A-Modelle (Viviroli, 2013).

In einem Gebiet, in dem langjährige Abflussmessreihen zur Verfügung stehen ist die Extremwertstatistik die gängigste Methode zur Hochwasserabschätzung. Für Sturzfluten ist diese Methode nicht geeignet, da diese oftmals nicht hydrometrisch überwacht werden und damit entsprechende Abflussmessreihen

fehlen (Steinbrich et al., 2016). Aus diesem Grund werden auf diese Gebiete oft regional-hydrologische Ansätze, wie Hüllformeln oder empirische Formeln, angewendet. Dem Regionalisierungsverfahren unterliegt die Idee, dass hydrologische Größen in ungemessenen Gebieten aus vorhandenen Gebietskennwerten oder vorhandenen Messungen abgleitet werden können. Die Anwendung dieses Verfahrens ist auf Einzugsgebietsgrößen von  $10-500~\rm km^2$  beschränkt. Die beiden erwähnten Ansätze berücksichtigen nicht die spezifischen Entstehungsbedingungen eines Hochwasserereignisses. Aufgrund dessen werden N-A-Modelle verwendet, die den simulierten Niederschlag mathematisch unter Berücksichtigung der Gebietseigenschaften in einen Abfluss umwandeln. Mit Hilfe eines mathematischen Zusammenhangs zwischen Niederschlag und Abfluss kann damit nicht nur der Hochwasserscheitel, sondern auch die gesamte Abflussganglinie an einem definierten Gewässerpunkt simuliert werden (Viviroli, 2013; Maniak, 2016). N-A-Modelle werden von Knapp et al. (1991) nach ihren Eigenschaften charakterisiert:

#### Ereignisbasierte und kontinuierliche Modelle

Mit ereignisbasierten Modellen wird die Abflussbildung einzelner Niederschlagsereignisse simuliert. Dabei werden nur die Prozesse des Wasserkreislaufs berücksichtigt, die in dem betrachteten Zeitraum relevant sind. Die Anfangsbedingungen für die Modellierung werden selbst festgelegt, durch eine Kalibrierung angepasst oder durch eine externe Approximation bestimmt. Das Zeitintervall, welches über die Modellierung konstant bleibt, liegt zwischen einigen Minuten bis hin zu mehreren Stunden. Dagegen können kontinuierliche Modelle längere Zeiträume simulieren und dabei sowohl die Niederschlagsereignisse als auch die niederschlagsfreien Zeiten berücksichtigen. Die Modellierung erfolgt in stündlichen oder täglichen Zeitschritten und berücksichtigt zusätzlich Prozesse wie beispielsweise die Evapotranspiration und den Basisabfluss (Knapp et al., 1991).

#### Konzeptionelle und hydrodynamische Modelle

Black-Box-Modelle basieren auf dem statistischen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße und beachten dabei keine physikalischen Prozesse. In konzeptionellen Modellen werden wenige, stark vereinfachte physikalischer Abläufe berücksichtigt. Sie stellen die Zwischenstufe zwischen Black-Box- und hydrodynamischen Modellen dar. In hydrodynamischen Modellen sind die physikalischen Grundgesetze implementiert, mit denen versucht wird die Teilprozesse so realitätsnah wie möglich abzubilden (Knapp et al., 1991).

#### Räumlich undifferenzierte und räumlich verteilte Modelle

In räumlich undifferenzierten Modellen bleibt die räumliche Variabilität verschiedener Parameter und Prozesse unberücksichtigt. Alle Eingangsdaten werden dabei über das gesamte Untersuchungsgebiet gemittelt. Im Gegensatz dazu wird in räumlich verteilten Modellen die räumliche Variabilität der Parameter und Prozesse innerhalb des Einzugsgebietes berücksichtigt. Die Skalierung der Modellierung ist von der Rastergröße der Geodaten abhängig. Da heutzutage hoch aufgelöste Geodaten zur Verfügung stehen, werden räumlich undifferenzierte Modelle überwiegend von räumlich verteilten Modellen abgelöst (Knapp et al., 1991).

#### Modelle mit kalibrierten, physikalisch bestimmten oder empirisch abgeleiteten Parametern

Eine Kalibrierung hat das Ziel, die Abweichungen zwischen den gemessenen und simulierten Abflusszeitreihen durch Veränderung der Eingangsparameter auf ein Minimum zu reduzieren. Kalibrierte Parameter sind spezifisch für ein Einzugsgebiet und lassen sich nur schwer auf andere Gebiete übertragen. Physikalisch bestimmte Parameter beruhen auf messbaren Einzugsgebietscharakteristika. Dazu gehört beispielsweise die Hangneigung oder die gesättigte Wasserleitfähigkeit des Bodens. Allerdings werden auch physikalisch bestimmte Parameter oftmals kalibriert, um die gemessenen Abflussmesswerte besser abbilden zu können. Empirisch abgeleitete Parameter werden mittels einer Regressionsanalyse kalibrierter oder physikalisch bestimmter Parameter ermittelt. Dieser Prozess ist jedoch aufwendig, mit Unsicherheiten behaftet und erfordert zusätzlich eine Kalibrierung der empirisch abgeleiteten Parameter (Knapp et al., 1991; Beven, 2012; Viviroli, 2013).

Neben der bereits erwähnten Kategorisierung der N-A-Modelle, wird häufig zusätzlich zwischen deterministischen Modellen und statistisch-stochastischen Modellen unterschieden. Die deterministischen Modelle stellen eine Ursache-Wirkung-Beziehung zwischen den Variablen her und sind somit ein Überbegriff für alle bisher beschrieben Modelle. Die statistischen Modelle ermöglichen die mathematischstatistische Erfassung von Zusammenhängen zwischen Ursache und Wirkung auf Grundlage von beobachteten Messwerten. Bei stochastischen Modellen ist entweder die Eingabefunktion eine Zufallsfunktion oder ihre Eingabeparameter sind Zufallsvariablen (Knapp et al., 1991; Liebscher und Mendel, 2010)

Für die Modellierung von Sturzfluten wurden in der Vergangenheit meist deterministische, räumlich undifferenzierte Modelle verwendet, weil sie einfach zu bedienen sind und wenig Rechenzeit benötigen. Jedoch kann bei der Modellierung keine räumliche Variabilität berücksichtigt werden und die Kalibrierung muss anhand langjähriger Messzeitreihen durchgeführt werden. Aus diesen Gründen und einer besseren Datenverfügbarkeit wurden einige Modelle zu räumlich verteilten Modellen weiterentwickelt (Hapuarachchi et al., 2011). Hapuarachchi et al. (2011) listet eine Vielzahl an Modellen auf, die sich für die Modellierung von Sturzfluten eignen. Unter anderem werden die Modelle MARINE (Borrell et al., 2006), TREX (England et al., 2007) und LISFLOOD (Roo et al., 2000) erwähnt. Die Vielzahl an verschiedenen Modellierungsansätzen zeigt, dass bisher keine universell einsetzbare Lösung für die Modellierung von Sturzfluten gefunden wurde.

An der Professur für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg wurde das räumlich verteilte Modell RoGeR entwickelt. Das Modell ist ein unkalibriertes, ereignisbasiertes N-A-Modell, das die verschiedenen Abflussbildungsprozesse in der Fläche und deren Abflusskonzentration zeitlich und räumlich hoch aufgelöst darstellen kann. Es wird skalenunabhängig genutzt und berücksichtigt alle relevanten Abflussbildungsprozesse, die sogar den Abfluss entlang präferentieller Fließwege und Trockenrisse beinhalten (Steinbrich et al., 2015, 2016a, 2016b, 2021). Eine ausführliche Modellbeschreibung ist in Kapitel 3.1 zu finden.

Steinbrich et al. (2016) stellen fest, dass RoGeR, unter Berücksichtigung der allgemeinen Unsicherheiten bei ereignisbasierten Modellierungen, für die Modellierung von Sturzfluten in kleinen Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen geeignet ist.

## 2. Problemstellung und Zielsetzung

Überflutungen und Sturzfluten infolge von Starkregenereignissen sind eine nicht zu unterschätzende Naturkatastrophe, die zu enormen Schäden führen kann (Beispiel Braunsbach 2016, Ahrtal 2021). Das räumliche und zeitliche Auftreten von Sturzfluten ist schwer vorhersagbar und deren Auswirkungen auf Städte und die Bevölkerung nicht einfach zu prognostizieren. Die Unwetterwarnungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) können nur als Vorwarnwerkzeug angesehen werden, da die Vorhersage lokaler Starkregenereignisse durch ihre hohe räumliche Variabilität nur bedingt möglich ist. Die Unsicherheit über das räumliche und zeitliche Auftreten von Starkregenereignissen erschweren geeignete Vorsorgemaßnahmen zu entwickeln. Im Zuge des Klimawandels nehmen die Wetterextreme zu, sodass in Zukunft viele weitere Städte von Starkregenereignissen überrascht werden. Besonders Stadtgebiete, die fernab von großen Gewässern liegen und bisher keinerlei Schutzkonzepte für Hochwässer oder Sturzfluten entwickelt haben, sind im Speziellen für Schäden gefährdet. Deshalb ist es wichtig die Bevölkerung für das Thema Starkregen zu sensibilisieren und Vorsorgemaßnahmen zu treffen. Die Städte werden sich in Zukunft zum langfristigen Schutz an die geänderten Klimabedingungen anpassen müssen. Dabei sind nicht nur steigende Starkregenereignisse, sondern auch steigende Temperaturen und Sturmereignisse zu beachten.

In Baden-Württemberg wurde von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW) ein Leitfaden zum Kommunalen Starkregenrisikomanagement erstellt, der die Kommunen mit einheitlichen Verfahren beim Starkregenrisikomanagement unterstützen soll. Dabei werden die Vorgehensweisen von der Überflutungsanalyse bis zur Erstellung von Handlungskonzepten bis ins Detail erläutert. Der Leitfaden soll die Verantwortlichen der Kommunen unterstützen, langfristige Schutzmaßnahmen zu entwickeln. Ein wichtiges Instrument für die Risikoabschätzung sind die Erstellung von Starkregengefahrenkarten, die auf Grundlage von Starkregenmodellierungen entstehen.

In den letzten 50 Jahren wurden zahlreiche N-A-Modelle entwickelt, um die Abflussbildungsprozesse und -konzentrationen bei starken Niederschlägen abzubilden. Da Sturzfluten meist in Gebieten auftreten, an denen keine für die Kalibrierung notwendigen Abflussmesswerte zur Verfügung stehen erschwert sich die Starkregenmodellierung. Die Entwicklung von unkalibrierten Modellen, die alle relevanten Prozesse berücksichtigen, skalenunabhängig angewendet werden können und die verschiedenen Abflussbildungsprozesse in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung simulieren können stellt eine Chance zur Verbesserung bzw. Ermöglichung von Starkregenanalysen und -modellierungen in diesen Gebieten dar. An der Professur für Hydrologie Freiburg wurde das unkalibrierte, ereignisbasierte Modell RoGeR entwickelt, welches bisher vielversprechende Ergebnisse geliefert hat.

Ziel dieser Arbeit ist mittels der neuesten Version von RoGeR Starkregenanalysen und -modellierungen in verschiedenen Stadtgebieten der Stadt Freiburg durchzuführen. Grundlage für die Auswahl der Untersuchungsgebiete sind Schadensmeldungen der Feuerwehr sowie Niederschlagsmesswerte zweier Messstationen. Das Modell soll anhand der untersuchten Schadensereignisse evaluiert sowie validiert werden. Die Modellevaluierung erfolgt aufgrund fehlender Abflussmesswerte nicht durch das

Abgleichen der simulierten und beobachteten Abflussganglinie. Stattdessen wird die räumliche Ausdehnung der simulierten Abflüsse und die maximalen Wasserstände und Durchflussmengen an den Schadstellen anhand verschiedener Daten abgeglichen. Die Feuerwehrdaten, Fotomaterial, Augenzeugenberichte und Zeitungsartikel bilden die Datengrundlage für die Modellevaluierung. Die Modellierungsergebnisse werden mit den Ergebnissen der Abflussberechnung mittels der Fließformel von Gauckler-Manning-Strickler verglichen und anschließend auf Plausibilität überprüft.

Zusätzlich wird durch die Verwendung des 100-jährigen Bemessungsniederschlags und geänderte Niederschlags- und Bodenvorfeuchteeingangsdaten analysiert, wie die Stadtgebiete unter anderen Bedingungen reagiert hätten bzw. reagieren könnten.

Neben den Erkenntnissen über die Abflussbildungsprozesse und -konzentrationen in den Untersuchungsgebieten, um beispielsweise Schutzmaßnahmen für künftige Starkregenereignisse abzuleiten, sind Modellevaluierungen von RoGeR essenziell, um zukünftig nicht nur auf Einzugsgebiete in Baden-Württemberg anwendbar zu sein.

### 3. Methoden und Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird zunächst das Modell RoGeR ausführlich beschrieben, bezüglich des Modellaufbaus, der Parametrisierung und der Anwendung. Anschließend wird die Vorgehensweise der Auswahl der Untersuchungsgebiete erläutert und die Methode vorgestellt, um die Kanalisation in der Starkregenmodellierung zu berücksichtigen. Danach wird der benötigte Bemessungsniederschlag, die Methoden der Modellevaluierung und das Vorgehen bei der Sensitivitätsanalyse spezifiziert.

#### 3.1 Das Niederschlags-Abfluss-Modell RoGeR

#### 3.1.1 Modellvorstellung

Das N-A-Modell RoGeR (**R**unoff **G**eneration **R**esearch Model) ist ein physikalisch-basiertes, hydrologisches Modell, welches nicht kalibriert werden muss. Bis zum Jahr 2014 war das Modell unter dem Namen DROGen (**D**istributed **R**unoff **Gen**eration Model) bekannt. An der Professur für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg wurde das Modell im Rahmen des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WaBoA) entwickelt, um die Abflussbildungsprozesse bei Niederschlägen verschiedener Intensitäten und unterschiedlicher Vorfeuchtebedingungen abzubilden (Steinbrich et al., 2015).

Unter Einbeziehung aktueller Erkenntnisse aus der hydrologischen Forschung wurde das Modell kontinuierlich weiterentwickelt und in verschiedenen Versionen weitere Prozesse des Wasserhaushaltes sowie der Abflusskonzentration (2D- Hydraulik) implementiert. Alle RoGeR-Versionen können die Prozesse der Abflussbildung, des Bodenwasserhaushalts und der Abflusskonzentration mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung von bis zu 1 x 1 m² und einer Minute darstellen. Berücksichtigt werden dabei auch Prozesse, wie beispielsweise die Infiltration und Zwischenabfluss durch präferentielle Fließwege (Makroporen und Trockenrisse), da diese je nach Gebietseigenschaften nicht zu unterschätzen sind. Die räumliche und zeitliche Auflösung der Modellierung wird jeweils durch die Auflösung der Eingangsdaten vorgegeben. Die Abflusskonzentration der verschiedenen Abflusskomponenten (Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Tiefenperkolation) wird anhand eines geomorphologischen Einheitsganglinienverfahrens dargestellt. Die Version RoGeR\_dyn kombiniert das ursprüngliche Modell mit einem 2D-hydraulischen Ansatz und berücksichtigt die Reinfiltration von Oberflächenabfluss in jeder Zelle zu jedem Zeitschritt. Parametrisiert wird RoGeR anhand landesweit verfügbarer Daten zur Landnutzung, Topographie, Geologie und Pedologie in Verbindung mit Expertenwissen aus der weltweiten Abflussbildungsforschung. Die Eingangsparameter sind entweder räumlich verteilt als GIS-Daten vorhanden oder in Tabellen, so genannten "Look\_up"-Tabellen, hinterlegt, die mit räumlich verteilten Daten verknüpft werden. Dementsprechend ist keine Kalibrierung erforderlich (Steinbrich et al., 2015; Steinbrich et al., 2016; Steinbrich et al., 2021).

Verifiziert wurde RoGeR unter anderem anhand von sieben Großberegnungsversuchen (75 m²) an fünf verschiedenen Standorten in der Schweiz. Diese wurden von Simon Scherrer durchgeführt und aufgezeichnet (Scherrer, 1997). Die Modellierung mit RoGeR konnte die gemessenen Oberflächen- wie auch Zwischenabflüsse sehr gut simulieren (Steinbrich et al., 2016). Des Weiteren wurde das Modell anhand von 33 beobachteten Hochwasserereignissen in 13 Einzugsgebieten (3-170 km²) in Baden-Württemberg

verifiziert. Die untersuchten Einzugsgebiete decken die in Baden-Württemberg vorkommenden Landnutzungen, Böden und geologischen Gegebenheiten ab. Ebenfalls wurden Starkregenereignisse verschiedener Längen und Intensitäten sowie ein großes Spektrum an Vorfeuchtebedingungen gewählt. Die simulierten und gemessenen Abflussganglinien an den Pegeln wurden bezüglich Abflussvolumen, Abflussspitze und Form der Abflussganglinie verglichen und analysiert. Bei 21 Ereignissen konnten die simulierten Abflussganglinien die beobachteten gut abbilden. Festgestellt wurde, dass das Modell besonders sensitiv auf den Niederschlagsinput und die Vorfeuchtebedingungen reagiert. Bei der ereignisbasierten Modellierung stellen diese beiden Faktoren die höchste Unsicherheit der Modellierung dar. Die Niederschlags-Radardaten werden beispielsweise durch Abschattungseffekte, Stationsdichte, topografische Effekte und von der Niederschlagsart beeinflusst. Die Daten der Vorfeuchtebedingungen zu Beginn eines Starkregenereignisses sind selbst das Ergebnis einer Modellierung, die wiederum von den Unsicherheiten dieser Eingangsdaten und der Modellstruktur abhängt. Unter Berücksichtigung dieser beiden Hauptunsicherheiten liefert RoGeR zufriedenstellende Ergebnisse und das ganz ohne Modellkalibrierung (Steinbrich et al., 2015; Steinbrich et al., 2016). Das Modell wurde bereits in vielen weiteren Projekten angewendet, welche in Steinbrich (2021) aufgelistet werden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass RoGeR die Abflussbildungsprozesse unter beliebigen Vorbedingungen in allen Regionen Baden-Württembergs skalenübergreifend von der Plot- bis zur Einzugsgebietsskale abbilden kann (Steinbrich et al., 2015).

Die in RoGeR berücksichtigten Prozesse, die bei der Abflussbildung in der Fläche bei Niederschlagsereignissen ohne Schnee- und Frosteinfluss eine Rolle spielen, sind in Abbildung 1 veranschaulicht.

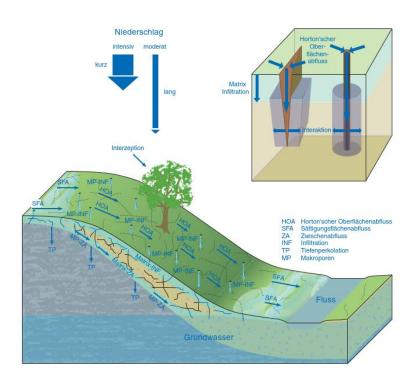


Abbildung 1: Die im N-A-Modell RoGeR implementierten Abflussbildungs- und Infiltrationsprozesse (LUBW, 2016b)

Die Niederschlagsintensität und -dauer beeinflusst maßgeblich die Lage, Dauer und Intensität der Abflussbildungsprozesse. Allgemein wird angenommen, dass konvektive Niederschläge mit hoher Intensität und kurzer Dauer infolge von Infiltrationsüberschuss überwiegend zu Horton'schem Oberflächenabfluss (HOA) führen. Dahingegen begünstigen lang andauernde advektive Niederschlagsereignisse Sättigungsflächenabfluss (SFA) und Zwischenabfluss (ZA) (Steinbrich et al., 2016).

Niederschlag, der auf Vegetation trifft, wird je nach Pflanzenart und Jahreszeit teilweise im Interzeptionsspeicher zurückgehalten. Die restliche Niederschlagsmenge erreicht den Boden und kann abhängig von der Niederschlagsintensität, den Bodeneigenschaften, den Vorfeuchtebedingungen und dem Versiegelungsgrad infiltrieren oder oberflächlich abfließen. Generell kann eine höhere Bodenvorfeuchte die Infiltrationskapazität verringern, wodurch die Bildung von Oberflächenabfluss begünstigt wird (Steinbrich et al., 2016).

Für die Reduzierung von HOA ist die Infiltration durch präferentielle Fließwege (Makroporen und Trockenrisse) von besonderer Wichtigkeit. Sobald im Boden die Feldkapazität überschritten wird, versickert das Wasser über das frei drainierende Porenvolumen (Luftkapazität) in tiefere Bodenschichten (Steinbrich et al., 2016). In einem Boden herrscht Feldkapazität, wenn durch die Wirkung der Schwerkraft die Grobporen entwässert sind und nur Wasser in den Mittel- und Feinporen gegen die Schwerkraft im Boden gehalten wird (Wessolek, 2016). Abhängig von der Durchlässigkeit der tiefen Bodenschichten und des Grundgesteins kann das Wasser weiter vertikal versickern (Tiefenperkolation) oder bei Überschreiten der Infiltrationskapazität eine Sättigungsfront bilden. Bei ausreichendem Gefälle und ausreichend hoher lateraler Durchlässigkeit des Bodens bewirkt die gesättigte Zone die Bildung von ZA. Die langsame Komponente des ZA fließt durch die Bodenmatrix (Matrix-ZA) und die schnelle Komponente durch lateral präferentielle Fließwege (MP-ZA). Bei vollständiger Sättigung des Bodens bildet sich SFA. Dies ist vor allem an Orten mit flachgründigen Böden mit geringer Speicherkapazität, einem undurchlässigen Untergrund und hohen Grundwasserständen zu beobachten (Steinbrich et al., 2016).

#### 3.1.2 Parametrisierung

Die Parametrisierung des Modells ist mit viel Arbeitsaufwand und Sorgfalt durchzuführen, da RoGeR nicht kalibriert werden muss. Die GIS-Datenbestände werden fortlaufend erweitert und verbessert, um die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen. Das Preprocessing ist somit einer der arbeitsintensivsten und wichtigsten Schritte bei der Anwendung von RoGeR. Die für die Modellierung benötigten Eingangsparameter und deren Quelle sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Unterschieden werden ereignisunabhängige Parameter, die zeitlich invariable Gebietseigenschaften wie beispielsweise die Oberfläche, die Hydrogeologie oder die Bodeneigenschaften beschreiben, und ereignisbasierte Parameter, die zeitlich variable Bedingungen beschreiben. (Steinbrich et al., 2021)

Tabelle 1: Für RoGeR erforderliche Eingangsparameter (verändert nach Steinbrich et al., 2021)

Parameter	Einheit	Quelle/Kommentar	
Einzugsgebiet/Oberfläche			
EZG	1/no Data	Definition des Gebietes	
Gefälle	[%]	Aus Digitalem Geländemodell	
Fließrichtung	D8	(DGM)	
Füllhöhe von Senken	[m]		
Fließzeiten Oberflächenabfluss	[h]	DGM, Landnutzung	
Fließzeiten Zwischenabfluss	[h]	DGM, BK50 oder BÜK	
Fließzeiten Grundwasserabfluss	[h]	DGM, Hydrogeologie	
Landnutzung		ATKIS, CORINE	
Versiegelungsgrad	[%]	WaBoA, ATKIS, CORINE	
Makroporendichte (vertikale)	$[m^2]$	In Abhängigkeit von Landnutzung	
Länge der vertikalen Makroporen	[cm]	und Skelettgehalt des Bodens	
Makroporendichte (hangparallele)	$[m^2]$		
Mittlere Grundwasserflurabstände	[cm]	DGM, Gewässernetz, Isolinien-	
		Pläne, GW-Messstellen	
Hydrogeologie			
Ks Untergrund	[mm/h]	Hydrogeologische Karte 1:50,000	
Boden			
Texturklasse nach KA5			
Bodenmächtigkeit	[cm]	BK50, BÜK	
nFK	[mm]		
Luftkapazität	[mm]		
Ks Oberboden	[mm/h]		
Muldenspeicher	[mm]		
Ereignisbasiert			
Vorfeuchte	[% nFK]	WH-Modell, Messung	
Trockenrisstiefe	[cm]		
Niederschlag	[mm]	Zeitreihe oder ein Raster je Zeit-	
		schritt	

Die einzelnen Modellparameter werden aus verschiedenen Datensätzen abgleitet, die bereits in Tabelle X erwähnt werden. Die verwendeten Datensätze unter Angabe ihrer räumlichen bzw. zeitlichen Auflösung, ihrer Herkunft und Verwendung im Modell sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Datensätze und deren Verwendung in RoGeR (verändert nach Steinbrich et al., 2016)

Datensatz	Auflösung	Herkunft	Verwendung
DGM	2 x 2 m <sup>2</sup>	Landesvermessungsamt	Abgrenzung des EZG,
		Baden-Württemberg (LV-	Berechnung der Hangneigung, Gewäs-
		BW)	sernetz und Grundwasserflurabstand
LIDAR	1 x 1 m <sup>2</sup>	LV-BW	DGM, Vegetationshöhe, Hangneigung
CORINE Landnutzung 2000	100 x 100 m <sup>2</sup>	Umweltbundesamt, Berlin	Parametrisierung der Makroporen, Inter-
			zeption, Bodentiefe, Mulden, Fließzei-
			ten, Versiegelungsgrad
Amtliches Digitales Wasser-	1:10,000	Landesanstalt für Umwelt,	Abgleich des aus dem DGM abgeleiteten
wirtschaftliches Gewässer-		Messung	Gewässernetzes
netz (AWGN)		und Naturschutz Baden-	
		Württemberg	
		(LUBW)	
Bodenübersichtskarte (BÜK)	1:200,000	Regierungspräsidium Frei-	Bodenspeicher, Bodentiefe, Skelettan-
		burg	teil,
		Landesamt für Geologie,	Bodentexturklassen
		Rohstoffe	
		und Bergbau (LGRB)	
Bodenkarte (BK50)	1:50,000	LGRB	Bodenspeicher, Bodentiefe, Skelettan-
			teil,
			Bodentexturklassen, gesättigte hydrauli-
			sche Leitfähigkeit
Hydrogeologische Karte Ba-	1:50,000	LGRB	Hydraulische Durchlässigkeit des Unter-
den-Württemberg (HK 50)			grundes
Niederschlagsradardaten	2 x 2 m <sup>2</sup>	Deutscher Wetterdienst	Niederschlagsinput
(RADOLAN)	5 min	(DWD)	
Niederschlagsmessung	5 min Summe	DWD	Kontrolle und Auswertung der Nieder-
			schlagsradardaten
RoGeR_WB_1D	2 x 2 m <sup>2</sup>		Bodenvorfeuchtebedingungen

#### Interzeption und Muldenspeicher

Für die Abschätzung der Größe des Interzeptionsspeichers bei einzelnen Niederschlagsereignissen werden die Eingangsparameter Landnutzung und Jahreszeit herangezogen. Dabei wird der von Bremicker (2000) im Wasserhaushaltsmodell LARSIM verwendete Ansatz genutzt, der einen saisonal abhängigen Blattflächenindex in ein einfaches Interzeptionsspeichermodell einbezieht (Steinbrich et al., 2015; Steinbrich et al., 2016). Als Interzeption wird die Verdunstung von Niederschlagswasser bezeichnet, welches an der Pflanzenoberfläche zurückgehalten worden ist (Weiler und Miegel, 2016). Ermittelt wird die Wassermenge, die zur Füllung der Interzeptionsspeicher benötigt wird und nicht zur Abflussbildung

beiträgt. Da die Höhe des Interzeptionsspeichers vom Blattflächenindex abhängig ist, verändert sich dieser ebenfalls saisonal. Die Werte des Interzeptionsspeichers für jeden Monat des Jahres für die verschiedenen in der Landnutzungsklassifizierung zusammengefassten Vegetationsklassen sind in einer Tabelle hinterlegt. Bei der Modellierung wird durch Angabe des Ereignisdatums auf die Werte des entsprechenden Monats zurückgegriffen (Professur für Hydrologie, o. J.). In RoGeR wird eine bestimmte Kodierung für die verschiedenen Landnutzungsklassen verwendet, die in Tabelle A. 1 dargestellt ist.

Mulden, Gräben oder sonstige Strukturen, die Wasser an der Oberfläche zurückhalten können, werden unter Angabe eines Muldenspeichers berücksichtigt. Dieser muss komplett gefüllt sein, damit Oberflächenabfluss an dieser Stelle entstehen kann. Ein Schätzwert von 20 mm wird als Rückhalt angenommen. Da RoGeR ein ereignisbasiertes Modell ist, wird die Verdunstung aus dem Interzeptions- und Muldenspeicher nicht berücksichtigt (Professur für Hydrologie, o. J.; Steinbrich et al., 2016).

#### **Matrixinfiltration**

Die Simulation der Matrixinfiltration wird nach der Methode von Green und Ampt (1911) umgesetzt, die von Peschke (1985) an die zeitlich variable Niederschlagsintensität angepasst wurde. Der Ansatz geht von der Bildung einer gleichmäßigen Sättigungsfront aus. Zwischen der gesättigten und ungesättigten Bodenmatrix herrscht eine Saugspannung, die nach einem Ansatz von Mein und Larson (1973) bestimmt wird. Die Ergebnisse sind in einer "Look\_up"-Tabelle festgehalten, wo sie für weitere Berechnungen abgerufen werden können. Die exakte Zuweisung von Identifikationsnummern zu den einzelnen Feinbodenklassen nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) ist unbedingt einzuhalten (siehe Tabelle A. 2). Das Ausmaß der Saugspannung, die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, die Niederschlagsintensität und die effektive Porosität (Peff), die als Summe aus nutzbarer Feldkapazität (nFK) und frei drainierbarem Porenvolumen (LK) definiert wird, beeinflussen die Infiltrationsgeschwindigkeit an der Sättigungsfront (Professur für Hydrologie, o. J.; Steinbrich et al., 2016).

Bei der Modellierung wird für jeden Zeitschritt und jede Rasterzelle die potentielle Matrixinfiltration und Tiefe der Sättigungsfront berechnet. Die potentielle Matrixinfiltration wird um den Versiegelungsgrad der Oberfläche reduziert. Die Wassermenge, die nach Abzug der tatsächlichen Matrixinfiltration und Interzeption noch verbleibend ist, bildet den potentiellen HOA (Steinbrich et al., 2016).

#### **Bodenspeicher**

Der potentiell verfügbare Bodenspeicher zu Beginn eines Niederschlagsereignisses ergibt sich aus der freien nutzbaren Feldkapazität und dem freien drainbaren Porenvolumen zu Beginn des Ereignisses. Zur Parametrisierung der Vorfeuchte wird nur die Füllung der nFK berücksichtigt, da angenommen wird, dass das frei drainierbare Porenvolumen seit dem letzten Niederschlagsereignis komplett entwässert und somit luftgefüllt ist. Bevor RoGeR zu einem Wasserhaushaltsmodell weiterentwickelt wurde, sind diese aus dem Grundwasserneubildungs-Modell Baden-Württemberg (GWN-BW) abgeleitet worden. In dem Modell sind Bodenfeuchte-Daten in täglicher Auflösung seit 1971 für ganz Baden-Württemberg verfügbar (Steinbrich et al., 2016; Professur für Hydrologie, o. J.).

Laut Steinbrich et al. (2016) liefert das GWN-BW trockenere Vorbedingungen im Vergleich zu den Ergebnissen der 1-D-Modellierung des Wasserhaushaltes mit dem Modell RoGeR\_WB\_1D. Es wird davon ausgegangen, dass RoGeR\_WB\_1D die Bodenvorfeuchtebedingungen für die Modellierung mit RoGeR besser abbilden kann. Für die in dieser Arbeit untersuchten Einzugsgebiete werden die Vorfeuchte-Daten aus der Modellierung mit RoGeR\_WB\_1D auf Grundlage der Klima- und Niederschlagsdaten der DWD-Wetterstation Freiburg ermittelt.

Die nFK, LK und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ergibt sich aus den vorliegenden Bodenkarten BÜK und BK50. Falls keine räumlich verteilten Informationen zu diesen bodenhydrologischen Kenngrößen verfügbar sind, können die Werte für die Feinbodenarten aus Tabellen der KA5 oder nach Wessolek et al. (2009) abgeleitet werden. Weitere Informationen zur Lagerungsdichte, dem Humusgehalt und dem Skelettgehalt können für die Abschätzung der Parameter hilfreich sein (Professur für Hydrologie, o. J.; Steinbrich et al., 2016).

#### Tiefenperkolation, Zwischenabfluss und Sättigungsflächenabfluss

Die potentielle Tiefenperkolation hängt von der hydraulischen Leitfähigkeit des Untergrundes bzw. Grundgesteins ab. Die Werte werden aus der hydrogeologischen Übersichtskarte Baden-Württembergs übernommen und in einen flächendeckenden Rasterdatensatz überführt. Die potentielle Tiefenperkolation wird auf Rasterzellen, die als Gewässer definiert sind oder deren Bodengründigkeit durch Grundwasser begrenzt wird, auf 0 gesetzt. Falls gering durchlässige Zwischenhorizonte bekannt sind, können diese unter Einhaltung einiger Voraussetzungen als Basis für die Tiefenperkolation gelten. Die Bedingungen hierfür sind, dass die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Zwischenhorizontes geringer als die des geologischen Untergrundes und gleichzeitig kleiner als 5 mm/h ist. Zusätzlich soll die Differenz der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit zwischen Oberboden und Zwischenhorizont größer als 5 mm/h sein. Sind diese Bedingungen erfüllt, dann ist die potentielle Tiefenperkolation an dieser Stelle mit der Durchlässigkeit des Zwischenhorizontes gleichzusetzen (Professur für Hydrologie, o. J.; Steinbrich et al., 2016).

Wenn mehr Wasser perkoliert, als der Untergrund aufnehmen kann, füllt sich die LK des darüberliegenden Bodens und bildet eine gesättigte Bodenschicht. Diese ist für die Bildung von langsamem Zwischenabfluss in der Bodenmatrix und schnellem Zwischenabfluss in lateralen präferentiellen Fließwegen erforderlich. Der Perkolationsüberschuss stellt somit die Menge an verfügbarem Wasser für den ZA dar (Steinbrich et al., 2016).

Der maximale langsame Zwischenabfluss durch die Bodenmatrix wird mit Hilfe der Darcy-Gleichung unter gesättigten Bedingungen abgeschätzt. Laut Weiler und McDonell (2004) ist der schnelle Zwischenabfluss in lateralen präferentiellen Fließwegen von der lateralen Makroporendichte, der Konnektivität und der Hangneigung abhängig. Aufgrund zunehmender Lagerungsdichte, abnehmender Wurzeldichte und abnehmender Aktivität der Bodenorgansimen nimmt mit zunehmender Bodentiefe die Dichte und Konnektivität der Makroporen ab. Es ist daher anzunehmen, dass die Abflussmenge und Fließgeschwindigkeit ebenfalls mit der Tiefe abnehmen. Im Modell wird das Bodenprofil in 20 cm mächtige

Kompartimente unterteilt, für die jeweils eine Beziehung zwischen der Fließgeschwindigkeit und der Hangneigung definiert ist (siehe Abbildung 2). Die acht verschiedenen Beziehungen spiegeln die in der Literatur angegebenen Bereiche der beobachteten Fließgeschwindigkeiten wider. Anhand dieser Beziehungen wird der maximal mögliche ZA abgeleitet. Abhängig von diesem wird der Perkolationsüberschuss anteilig auf die beiden Komponenten schneller und langsamer Zwischenabfluss aufgeteilt (Professur für Hydrologie, o. J.; Steinbrich et al., 2015; Steinbrich et al., 2016).

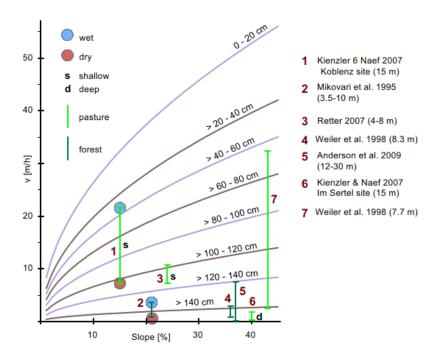


Abbildung 2: Ableitung der Fließgeschwindigkeiten für den schnellen Zwischenabfluss in RoGeR (Steinbrich et al., 2016)

Überschreitet das infiltrierte Wasser nach Abzug der Tiefenperkolation und des ZA die Bodenporosität, sättigt sich das gesamte Porenvolumen des Bodenprofils und führt zu Sättigungsflächenabfluss. Besonders relevant ist dieser Abflussbildungsprozess in Gebieten mit hohen Grundwasserspiegeln oder in Gewässernähe, wo die Böden allgemein durch wenig freies, ungesättigtes Porenvolumen geprägt sind. An diesen Standorten wird die Bodengründigkeit um die Höhe der Grundwasserflurabstände reduziert (Steinbrich et al., 2016). Diese können mit dem Werkzeug "vertical distance to groundwater" aus der GIS Software SAGA berechnet werden (Olaya, 2004).

#### Makroporen- und Trockenrissinfiltration

Scherrer (1997) zeigt in zahlreichen Beregnungsversuchen mit hohen Niederschlagsintensitäten, dass häufig mehr Wasser infiltrieren kann, als aufgrund der Eigenschaften der Bodenmatrix zu erwarten ist. Als Ursache wird die Infiltration durch präferentielle Fließwege genannt, die im Boden durch Makroporen (beispielsweise Erosionsröhren oder Tiergänge) oder Schrumpfungsrisse entstehen. Beiden Prozessen wird ein großer Einfluss auf die Abflussbildung, vor allem bei hohen Niederschlagsintensitäten, zugesprochen. Aufgrund dessen sind beide Prozesse in RoGeR implementiert (Steinbrich et al., 2016).

Die potentielle Makroporeninfiltration wird über den von Weiler und Flühler (2004) beschriebenen Zusammenhang zwischen Makroporendichte und dem Anteil der in die Makroporen entwässernden Fläche von der Gesamtfläche ermittelt. Die tatsächliche Makroporeninfiltration ist von der Interaktion zwischen Makroporenwand und umgebener Bodenmatrix abhängig. Zur Abschätzung dieser horizontalen Infiltration wird eine modifizierte Variante der Methodik nach Green und Ampt (1911) verwendet. Dabei entsteht eine radiale, sich in horizontale Richtung um die Makropore herum fortschreitende Sättigungsfront (Beven und Clark, 1986). Da sich während der Infiltration die Sättigungsfront der vertikalen Infiltration ebenfalls ausbreitet, verkürzt RoGeR schrittweise die aktive Makroporenlänge (Steinbrich et al., 2016).

Für die Modellierung der Makroporeninfiltration wird die Makroporendichte und -länge abhängig von der Landnutzungsklasse abgeschätzt. Die Parametrisierung erfolgt anhand eines einheitlichen Makroporendurchmessers von 5 mm. Die entsprechenden Werte der Makroporenausstattung sind in Tabelle A. 3 abgebildet. Bei teilweise oder ganz versiegelten Flächen erfolgt die Parametrisierung aufgrund des Versiegelungsgrades. Um den Effekt eines erhöhten Skelettgehaltes auf die Infiltration durch präferentielle Fließwege zu berücksichtigen, erhalten die Makroporendichten der Böden mit einem Skelettgehalt zwischen 10 und 25 % und Böden mit einem Skelettgehalt zwischen 25 und 50 % je einen Zuschlag von 25 Makroporen/m² bzw. 50 Makroporen/m² (Professur für Hydrologie, o. J.; Steinbrich et al., 2016).

Trockenrisse entstehen infolge von Quell- und Schrumpfungsprozessen in tonhaltigen Böden. Generell gilt, je tonhaltiger ein Boden, desto ausgeprägter ist das Phänomen des Quellen und Schrumpfens (Blume et al., 2009). Der Tongehalt und die Bodenfeuchte bestimmen das Vorhandensein, die Anzahl und die Tiefe von Trockenrissen. Bindige Böden sind bis zu einem gewissen Wassergehalt plastisch verformbar und beginnen erst bei Unterschreitung von diesem Wassergehalt die Bildung von Rissen (Steinbrich et al., 2016). Laut Ad-Hoc-Arbeitsgruppe (2005) geschieht dies ab einem Matrixpotential von 500 hPA und wird als Ausrollgrenze bezeichnet. Der Schrumpfungsprozess erreicht seinen Grenzwert bei einem Matrixpotential von 10.000 hPA, an dem dieser auch die maximale Trockenrisstiefe erreicht.

Zwischen dem Bodenfeuchtegehalt der Ausrollgrenze und der Schrumpfungsgrenze geht RoGeR von einer linearen, zeitlichen Entwicklung der Risse aus (Steinbrich et al., 2016). Durch die Festlegung der Ausroll- und Schrumpfungsgrenze kann mit Formel 1 - 3 für jede beliebige Bodenfeuchte zwischen den beiden Grenzen die aktuelle Trockenrisstiefe (RT<sub>akt</sub>) bestimmt werden. Als Eingangsparameter werden die aus den Tongehalten abgeschätzten maximalen Trockenrisstiefen und die Wassergehalte für Ausrollgrenze, Schrumpfungsgrenze und aktueller Bodenfeuchte benötigt (Professur für Hydrologie, o.J.).

$$RT_{akt} = \frac{(ARG - BF_{akt})}{D_{ARG SG}} * TRL_{max} \text{ für ARG} > BF_{akt} > SG$$
 (1)

$$RT_{akt} = 0 \text{ für BF}_{akt} \ge ARG$$
 (2)

$$RT_{akt} = TRL_{max} \text{ für BF}_{akt} \le SG$$
 (3)

ARG: Ausrollgrenze [% nFK]

SG: Schrumpfungsgrenze [% nFK]

BF<sub>akt</sub>: Aktuelle Bodenfeuchte [% nFK]

D<sub>ARG\_SG</sub>: Differenz Ausrollgrenze-Schrumpfungs-

grenze [% nFK]

TRL<sub>max</sub>: Maximale Risstiefe [cm]

#### Abflusskonzentration

RoGeR wurde in erster Linie entwickelt, um die räumlichen und zeitlichen Abflussbildungsprozesse zu bestimmen. Da diese üblicherweise nicht gemessen werden, wird mit den in RoGeR implementierten Routing-Routinen die Abflusskonzentration berechnet, um die Modellierung mit Messungen an den Messpegeln vergleichen zu können. Für den Oberflächenabfluss, den langsamen und schnellen Zwischenabfluss und den Grundwasserabfluss wird mit Hilfe einfacher GIS-gestützter Methoden (Berechnung der Fließzeiten des Abflusses jeder Rasterzelle zum Pegel) eine geomorphologische Einheitsganglinie berechnet (Steinbrich et al., 2015; Steinbrich et al., 2016)

Um die Fließzeiten bestimmen zu können, die der Oberflächenabfluss bis zum Erreichen des Pegels benötigt, wird zunächst die Fließgeschwindigkeit berechnet. Die Fließgeschwindigkeit jeder Zelle wird mittels der Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler bestimmt. Für den Oberflächenabfluss wird eine 1 mm dünne laminar fließende Wasserschicht angenommen. Den verschiedenen Landnutzungsklassen und Versiegelungsgraden werden für die Berechnung verschiedene Rauigkeitsbeiwerte zugewiesen (Professur für Hydrologie, 0.J.). Fließgewässern wird ein einheitlicher Wert von 3 m/s und stehenden Gewässern ein Wert von 0.01 m/s zugeordnet. In Karstgebieten wird eine Fließgeschwindigkeit des Grundwasserflusses von 0.012 m/s angenommen. Aus der Fließgeschwindigkeit wird die Fließzeit zum Pegel je Meter [1/10s] berechnet, woraus ein Fließzeiten-Raster entsteht, das die Fließzeit des Oberflächenabflusses in jeder Zelle im EZG zum Pegel wiedergibt (Steinbrich et al., 2016; Professur für Hydrologie, o. J.).

Für den Zwischenabfluss wird ebenfalls ein solches Fließzeiten-Raster erstellt. Zur Ableitung der Fließzeiten des schnellen Zwischenabflusses wird je Tiefenhorizont die Hangneigung herangezogen. Jedem dieser Werte wird für jeden Tiefenhorizont eine Fließzeit zugewiesen (siehe Abbildung 2). Der maximale langsame Zwischenabfluss durch die Bodenmatrix wird wie bereits weiter oben beschrieben mit Hilfe der Darcy-Gleichung unter gesättigten Bedingungen ermittelt. Unter Einbeziehung des Zusammenhangs zwischen Fließgeschwindigkeit, Bodenmächtigkeit und Hangneigung werden auch hier Fließzeiten abgeschätzt (Steinbrich et al., 2016; Professur für Hydrologie, o. J.).

Diese beiden Herangehensweisen werden ausschließlich für die Grundversion von RoGeR eingesetzt. In RoGeR\_dyn ist ein dynamisch hydraulischer 2-D-Ansatz implementiert. Es wird angenommen, dass dieser dynamische Ansatz vor allem in Wohngebieten besser geeignet ist, da beispielsweise die hohen Abflusskonzentrationen auf Straßen zu viel höheren Fließgeschwindigkeiten führen können, als mit der angenommenen 1 mm dünnen laminar fließenden Wasserschicht überhaupt erreicht werden können (Steinbrich et al., 2016).

#### 3.1.3 Anwendung

RoGeR\_Dyn ist in der Programmiersprache Python (3.8.8) geschrieben und kann beispielsweise über die integrierte Open-Source-Entwicklungsumgebung Spyder geöffnet werden. Das Modell wird über eine Steuerungsdatei ("Control\_File") im csv.-Format konfiguriert. Mit Hilfe dieser Datei werden Dateipfade zu den Eingangsdatensätzen und Ergebnissen gesetzt sowie Modelleinstellungen kontrolliert. Die Eingangsdaten für die Modellierung müssen als Rasterdatensätze im Floating Binary Format (.flt) vorliegen. Während eines Modelllaufs werden die Rasterzellen mit dem Wert 1 berücksichtigt, während den anderen Zellen No-Data-Werte oder "0" zugewiesen werden. Alle Eingangsdaten müssen exakt die gleiche räumliche Ausdehnung und Auflösung haben, um in RoGeR genutzt werden zu können. Niederschlagsdaten können alternativ auch als Zeitreihe in einer Textdatei (.txt) organisiert werden (Professur für Hydrologie, 2021).

Für die Bearbeitung der Datensätze werden die Softwareprodukte ArcMap und ArcScene des geographischen Informationssystems ArcGIS (Version 10.6) genutzt. Auswertungen werden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel (Version 2010) und dem Statistikprogramm RStudio (R Version 4.0.3) durchgeführt.

#### 3.2 Auswahl der Stadtgebiete

Die zu untersuchenden Stadtgebiete wurden auf Grundlage von Daten der Feuerwehr Freiburg ermittelt, die die Feuerwehreinsätze der Jahre 2015 – 2021 beschreiben, bei denen Sturm-/Unwetter-/ und Wasserschäden sowie Hochwasser die Auslöser waren. Die Daten umfassen den Zeitraum vom 13.05.2015 bis zum 29.06.2021, wobei Daten zu den Jahren 2019 und 2020 fehlen. Die zur Verfügung gestellten Daten geben Auskunft über die einzelnen Feuerwehreinsätze in Bezug auf Uhrzeit, Adresse, geographische Position, technische Ursache, Haupttätigkeit und Beschreibung des Einsatzablaufes. Anhand der detaillierten Beschreibung des Einsatzablaufes können die für eine Starkregenanalyse interessanten Einsätze identifiziert werden. Einsätze, bei denen keine Maßnahmen nötig waren oder keine Auskunft über die Position protokolliert wurde, sowie Einsatzabbrüche, werden im weiteren Verlauf nicht berücksichtigt. Der Fokus dieser Arbeit liegt bei Ereignissen, bei denen Starkniederschläge zu Überschwemmungen führen, die im Stadtgebiet generiert werden und unabhängig von Fließgewässern auftreten. Feuerwehreinsätze mit der technischen Ursache Hochwasser sind daher ebenfalls ausgenommen. Des Weiteren werden Ereignisse in den Wintermonaten aufgrund der Beeinflussung von Schneeschmelze nicht näher untersucht. Durch die Analyse und Eingrenzung der Daten in Excel wurden insgesamt 351 Einsätze auf 177 potenziell für eine Starkregenanalyse interessante Einsätze reduziert. Um einen besseren Überblick zu erhalten, werden die einzelnen Feuerwehreinsätze zeitlich nach Tag und Jahr sortiert, sowie räumlich in einem GIS dargestellt. Er werden verschiedene Karten in ArcGIS erstellt, in denen Muster der räumlichen Verteilung der Einsätze erkennbar werden. Zusätzlich werden Niederschlagsdaten zwei unterschiedlicher Wetterstationen in Freiburg betrachtet, um die Starkregenereignisse, welche Auslöser für die Feuerwehreinsätze waren, in Höhe und Intensität bewerten zu können. Die Niederschlagsdaten werden von der Wetterstation vom DWD am Flughafen Freiburg (Climate Data Center DWD, 2021) und vom Weinbauinstitut (Agrarmeteorologie BaWü, 2021) bezogen. Auf Grundlage dieser Daten wurden interessante Stadtgebiete und Starkregenereignisse für die Starkregenmodellierung und -analyse dieser Masterarbeit identifiziert.

#### 3.3 Ortsbegehung

Am 01.03.2022 wurde eine Ortsbegehung der ausgewählten Untersuchungsgebiete durchgeführt, um die Begebenheiten vor Ort nachvollziehen zu können. Dies war notwendig, da bei einer ersten Modellierung an einigen Stellen unrealistische Wasserstände modelliert wurden. Kleinräumige Höhenstrukturen, die Lage des Gewässernetzes, Brücken, Dolen und sonstige Auffälligkeiten wurden aufgenommen und dementsprechend in dem DGM angepasst. Darüber hinaus wurden die Fließwege im Untersuchungsgebiet und an den einzelnen Schadstellen nachkonstruiert, um auf Grundlage dessen die Modellierungsergebnisse einfacher nachvollziehen und bewerten zu können.

Um die Kanalisation in die Starkregenmodellierung einbeziehen zu können, wurden in beiden Untersuchungsgebieten entlang der Hauptfließwege geometrische und geografische Daten der Straßeneinläufe und Kanalschächte erhoben. Zusätzliche Informationen über das Starkregenereignis konnten durch verschiedene Gespräche mit Anwohnern und der Ortsverwaltung gewonnen werden. Damit konnten beispielsweise weitere Schadstellen identifiziert werden, an denen die Starkregenmodellierung evaluiert werden kann. Zudem wurde für die Modellevaluierung Fotomaterial von Anwohnern und der Ortsverwaltung zur Verfügung gestellt.

#### 3.4 Kanalisation

In einem Stadtgebiet ist ein Großteil der versiegelten Fläche an ein Entwässerungsnetz angeschlossen, um einer lokalen Überflutung vorzubeugen und die Verkehrssicherheit auf den Straßen zu gewährleisten (Weiler 2016). Unterschieden wird bei der Planung und Sanierung von Entwässerungssystemen zwischen Misch- und Trennkanalisationen. Zusätzlich gibt es auch modifizierte Mischsysteme. In einer Mischkanalisation werden die bei Niederschlägen anfallenden Wassermengen zusammen mit dem Abwasser in einem Kanal zur Kläranlage abgeleitet. Angesichts der begrenzten Leistungsfähigkeit der Kläranlage werden an geeigneten Stellen Regenentlastungsbauwerke oder Regenrückhalteräume geschaffen. Darüber hinaus wird nicht behandlungsbedürftiges Wasser nach Möglichkeit dezentral offenen Gewässern zugeführt oder an anderer Stelle versickert. Bei einer Trennkanalisation wird Schmutz- und Niederschlagswasser jeweils in einem separaten Kanal abgeführt, wobei das Niederschlagswasser dem nächstgelegenen Regenentlastungsbecken oder Gerinne zufließt und das Schmutzwasser zur Kläranlage abgleitet wird. Bei den modifizierten Mischsystemen wird die Niederschlagswassermenge in behandlungsbedürftiges und nicht behandlungsbedürftiges Niederschlagswasser unterteilt. Ersteres wird dem Schmutzwasserkanal zugeführt, während Zweiteres versickert, genutzt oder in Gewässer eingeleitet wird (Engelhardt et al. 2020).

Um die Kanalisation in die Starkregenmodellierung mit RoGeR\_dyn einzubeziehen, werden die Kanalschächte und Straßeneinläufe als Dolen betrachtet, die an einem Ort im Einzugsgebiet Wasser aufnehmen und an einem anderen Ort wieder abgeben. Benötigt wird eine Raster-Datei im Floating Binary Format mit dem Namen "dolen ein", welche die geografische Lage der Kanalschächte und

Straßeneinläufe enthält. Dabei wird jedem Pixel, das einen Kanalschacht oder einen Straßeneinlauf repräsentiert, eine Nummer zugewiesen. In einer CSV-Datei werden diesen Nummern die jeweiligen Aufnahmekapazitäten zugewiesen. Unter Angabe einer Fließzeit kann bestimmt werden, wann das aufgenommene Wasser an einer anderen Stelle austreten soll. Hierfür ist eine weitere Raster-Datei im Floating Binary Format mit dem Namen "dolen\_aus" erforderlich, die den Ort eines solchen Wasseraustrittes unter Berücksichtigung einer übereinstimmenden Nummerierung beschreibt. Sinnvoll ist dies vor allem, wenn in einem Einzugsgebiet eine Trennkanalisation vorhanden ist und das Niederschlagswasser an verschiedenen Orten einem Gerinne zufließt. Sofern keine Fließzeit und Ort des Wasseraustrittes festgelegt wird, verschwindet das Wasser aus dem Einzugsgebiet und wird in der Modellierung nicht weiter berücksichtigt.

Um die Aufnahmekapazitäten der Kanalschächte und Straßeneinläufe zu bestimmen, werden zwei verschiedene Berechnungsansätze verwendet.

#### Kanalschächte

Der von BIT Ingenieure zur Verfügung gestellte Datensatz, der Informationen über die Kanalschächte, Auslässe und Haltungen in den jeweiligen Einzugsgebieten enthält, wird genutzt, um die Kanalschächte in die Modellierung miteinzubeziehen. Da im Zuge der Ortsbegehung ebenfalls Daten zu den Kanalschächten aufgenommen wurden, konnten beide Datensätze miteinander verglichen bzw. ergänzt werden. In den zu untersuchenden Einzugsgebieten wird zur Vereinfachung die hohe Gesamtzahl an Kanalschächte auf eine übersichtliche Anzahl zusammengefasst. Diese werden gleichmäßig über das Einzugsgebiet verteilt, sodass sie sich an den Stellen befinden, an denen mehrere Kanalrohre zusammenfließen und an denen eine hohe Fließakkumulation vorherrscht. Um die Kapazität der Kanalisation abschätzen zu können, wird ein simpler Ansatz verwendet. Am Kanalauslass wird die maximale Kapazität des Kanalrohres anhand der Kontinuitätsgleichung und der empirischen Fließformel von Gauckler-Manning-Strickler berechnet (Formel 4-6). Diese berechnete maximale Abflussmenge wird auf alle berücksichtigten Kanalschächte gleichmäßig aufgeteilt.

$$v = k_{st} * R_h^{\frac{2}{3}} * I_0^{\frac{1}{2}}$$
 (4)

$$R_h = \frac{A}{II} \tag{5}$$

$$Q = A * v \tag{6}$$

v: Fließgeschwindigkeit [m/s]

k<sub>st</sub>: Manning-Strickler Beiwert [m<sup>1/3</sup>/s]

R<sub>h</sub>: hydraulischer Radius [m]

I<sub>0</sub>: Sohlgefälle [-]

Q: Durchfluss [m<sup>3</sup>/s]

A: Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>]

U: benetzter Umfang [m]

#### Straßeneinläufe

Da keine Daten zu den Straßeneinläufen in den Einzugsgebieten vorliegen, werden im Zuge einer Ortsbegehung sowohl geometrische als auch geografische Daten zu den Straßeneinläufen aufgenommen. Die Datenaufnahme beschränkt sich aufgrund begrenzter Ressourcen auf die Hauptfließpfade in den zu untersuchenden Stadtgebieten. In den Untersuchungsgebieten wurden drei verschiedene Pultaufsätze identifiziert, deren geometrische Daten in Tabelle 3 dargestellt sind.

Die maximale Aufnahmekapazität der einzelnen Straßeneinläufe während des Niederschlagsereignisses wird nach einer Formel von Kemper (2018) berechnet. Diese findet Anwendung bei Straßenablauf-Aufsätzen in Pultform ohne Rückstau aus der Kanalisation und bei ausschließlich schießenden und turbulenten Abflusszuständen auf der Straße. Der Einfluss von Verlegung durch Laub und Schmutz sowie der Fließzustand einer vollständigen Überströmung des Aufsatzes werden nicht berücksichtigt. Die Arbeit von Kemper (2018) beschäftigt sich mit dem Einfluss hydraulischer und geometrischer Größen auf die Leistungsfähigkeit von Pultaufsätzen, die in verschiedenen physikalischen und numerischen Modellversuchen analysiert werden. Die Eingangsgrößen, die für die von Kemper (2018) entwickelte Berechnungsformel umfassen die hydraulischen Größen Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit sowie die geometrischen Größen Aufsatzbreite BA, Aufsatzlänge LA, Öffnungsfläche A0 und die Strebenanordnung. Als maßgebliche Einflussgrößen gelten die Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit, die von der Straßengeometrie (Längsneigung S<sub>L</sub> und Querneigung S<sub>T</sub>) und dem Regenabfluss abhängen. Da für die Berechnung der Leistungsfähigkeit ausschließlich der frontale Zufluss auf die Breite des Pultaufsatzes Q<sub>F</sub> betrachtet wird (Formel 10), wird zunächst der auf die gesamte Straßenbreite bezogene Abfluss Q mit Hilfe der Formel 8 berechnet. Darüber hinaus wird mittels der Formel 9 der am Aufsatz vorbeifließende Abfluss Q<sub>s</sub> ermittelt. Da sich Q aus Q<sub>F</sub> und Q<sub>S</sub> zusammensetzt, kann im nächsten Schritt Q<sub>F</sub> berechnet werden, um damit die noch nicht bekannte Fließgeschwindigkeit zu bestimmen. Anhand dieser Ergebnisse kann die aufsatzbezogene Froude-Zahl Fra mittels Formel 11 berechnet werden, um schlussendlich die maximale Aufnahmekapazität des Straßenablauf-Aufsatzes Q1 anhand der Formel 7 berechnen zu können (Kemper 2018).

$$Q_{l} = \left(1 - Fr_{A}^{9.5} * \left(\frac{h_{A}^{1.5} * B_{A}}{\sqrt{L_{A}} * A_{0}}\right)^{S}\right) * Q_{F}$$
(7)

$$Q = 0.315 * k_{st} * S_T^{\frac{5}{3}} * S_I^{\frac{1}{2}} * W^{\frac{8}{3}}$$
 (8)

$$Q_s = 0.375 * k_{st} * S_T^{\frac{5}{3}} * S_I^{\frac{1}{2}} * (W - B_A)^{\frac{8}{3}}$$
(9)

$$Q_F = h_A * v_A * B_A \tag{10}$$

$$Fr_A = \frac{v_A}{\sqrt{g * h_A}} \tag{11}$$

 $h_A$ : auf die Aufsatzbreite bezogene mittlere Wassertiefe [m]

v<sub>A</sub>: auf die Aufsatzbreite bezogene mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

B<sub>A</sub>: Breite des Straßenablauf-Aufsatzes [m]

LA: Länge des Straßenablauf-Aufsatzes [m]

 $A_0$ : Öffnungsfläche des Straßenablauf-Aufsatzes  $[m^2]$ 

W: Straßenbreite [m]

k<sub>st</sub>: Manning-Strickler Beiwert [m<sup>1/3</sup>/s]

g: Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

S: Parameter zur Berücksichtigung der Strebenanordnung [-]

Laut Kemper (2018) bestehen folgende Anwendungsgrenzen für die Berechnungsformel: schießender und rückstaufreier Abfluss (Fr\_A > 1), teilweise oder keine Überströmung des Straßenablauf-Aufsatzes, 0.0061 m  $\leq h_A \leq 0.0258$  m und 0.6592 m/s  $\leq v_A \leq 1.6777$  m/s. Innerhalb dieser Anwendungsgrenzen lässt sich die Formel auf alle Pultaufsätze anwenden.

Tabelle 3: Geometrische Daten der bei der Ortsbegehung aufgenommen Straßeneinläufe

Typ	Geometrie	Größe	Öffnungsfläche	Schlitzweite	
		[mm]	[cm <sup>2</sup> ]	[mm]	
1	ES DEPOSITES ES DESCRIPTION DE LA CONTROL DE	500 x 500	980	36	
2	COUSSEUMANATURWERK MAISERSLAUTERNI	540 x 540	1040	30	
3	THIS AND ADDRESS OF THE PARTY O	495 x 780	1940	40	

#### 3.5 100-jähriges Niederschlagsereignis

Bemessungsniederschläge werden als Grundlage für die Planung von siedlungs- und wasserwirtschaftlichen Maßnahmen benötigt. Beispielsweise sind Kanalnetzberechnungen für die Siedlungsentwässerung, Dimensionierung von Versickerungsanlagen, Regenentwässerungen, Rückhaltebecken und

anderer Bauwerke nicht ohne diese Größe möglich. Mithilfe von hydrologischen und/oder hydraulischen Modellen werden die hierfür benötigten Zielgrößen berechnet. Allgemein wird ein Bemessungsniederschlag als einen Starkniederschlag definierter Höher, Dauer und Jährlichkeit bezeichnet (Haberlandt, 2016; Disse, 2020).

In Deutschland kann als Input in NA-Modellen bei Bemessungsaufgaben auf den vom DWD herausgegebenen KOSTRA-Atlas zurückgegriffen werden, der eine umfassende Auswertung der für Deutschland verfügbaren Niederschlagsinformationen nach Niederschlagsdauer, -höhe und der Häufigkeit des Auftretens enthält. Die Datengrundlage hierfür ist eine Messzeitreihe von 1951 - 2010. KOSTRA steht für Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung und umfasst Niederschlagshöhen von 5 min bis 72 Stunden Dauer und Jährlichkeiten zwischen 1 und 100 Jahren für die Fläche Deutschlands dargestellt in einem rund 67 km² großen Raster. Die neueste Ausgabe KOSTRA-DWD 2010R berücksichtigt den Revisionsbericht des DWD vom Oktober 2017 und nutzt ein überarbeitetes Auswertungsverfahren. Da die angegebenen Niederschlagshöhen mit statistischen Methoden geschätzt werden, sind Unsicherheitsbereiche in Abhängigkeit der Jährlichkeit T angegeben. Für Niederschlagshöhen der Jährlichkeit 1-5 Jahre gilt ein Toleranzbereich von  $\pm 10\%$ , bei 5-50 Jahren gilt ein Toleranzbereich von  $\pm$  15% und bei 50 – 100 Jahren gilt ein Toleranzbereich von  $\pm$  20% (Junghänel et al., 2017). Für Einzugsgebiete mit einer Größe von weniger als 25 km² können die Werte aus dem KOSTRA-Atlas als Gebietsniederschlag verwendet werden. Bei größeren Gebieten werden die Niederschlagshöhen mit einem von der Fläche und Niederschlagsdauer abhängigen Abminderungsfaktor multipliziert (Disse, 2020).

In dieser Arbeit wird die Abflussreaktion der Untersuchungsgebiete unter den Niederschlagsbedingungen eines Bemessungsniederschlages mit der Jährlichkeit von 100 Jahren und einer Dauer von 165 Minuten untersucht und mit den Ergebnissen der Ausgangsmodellierung verglichen. Für die Verteilung der Niederschlagshöhen wird je eine Variante einer anfangs-, mitten- und endbetonten Verteilung verwendet. Eine anfangsbetonte Verteilung ergibt sich aus dem Zuwachs an Niederschlag von einer zur nächsten Dauerstufe, wenn angenommen wird, dass in einem Niederschlag einer bestimmten Jährlichkeit und Dauer alle kürzeren Niederschläge derselben Jährlichkeit enthalten sind. Eine endbetonte Verteilung ergibt sich durch die Umkehrung der Reihenfolge der anfangsbetonten Verteilung. Die Euler Typ II Verteilung wird als mittenbetonte Variante angewandt. Bei dieser Verteilung tritt das Intervall mit der höchsten Niederschlagsintensität beim 0.3-fachen der Bemessungsdauer auf. Ausgehend von diesem Spitzenintervall schließen sich links bis zum Erreichen des Zeitpunktes Null die nächstniedrigeren Niederschlagsintervalle an. Die restlichen Intervalle füllen die Zeitreihe vom Spitzenintervall bis zum Ende des Bemessungsniederschlags auf (Thiele und Büttner, 2012).

Für die Starkregenanalyse werden Bemessungsniederschläge mit einer Dauer von 180 Minuten und einer Jährlichkeit von 100 Jahren verwendet. Auf Grundlage dieser Daten werden die verschiedenen Niederschlagsverteilungen für eine Dauer von 165 Minuten abgeleitet. In Abbildung 3 ist das 100-jährige Niederschlagsereignis in einer anfangs-, mitten- und endbetonten Intensitätsverteilung, sowie die 5-Minuten Niederschlagsradardaten des zu untersuchenden Starkregenereignisses dargestellt. Die

Niederschlagssumme des Starkregenereignisses beträgt 52 mm, während das 100-jährige Niederschlagssereignis eine Niederschlagssumme von rund 68 mm beträgt.

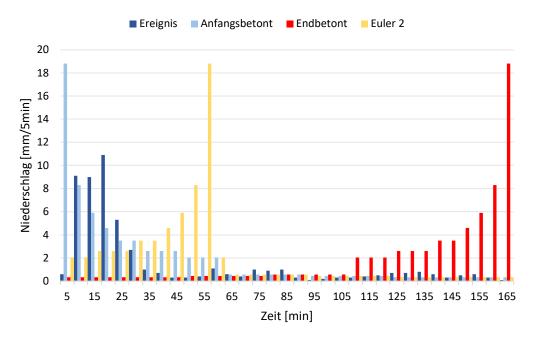


Abbildung 3: 100-jähriges Niederschlagsereignis in der Dauerstufe 165 Minuten mit einer anfangs-, mittenund endbetonten Intensitätsverteilung und die 5-Minuten-Niederschlagsdaten des zu untersuchenden Starkregenereignisses

#### 3.6 Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse untersucht, wie stark sich die Veränderung eines Eingabeparameters auf das Modellergebnis auswirkt. Dabei handelt es sich um die Untersuchung der Bedeutung der Unsicherheit von Modelleingabeparametern in einem Modellierungsprozess. Die Eigenschaften der Sensitivitätsanalyse hängen von dem jeweiligen Kontext und der Fragestellung ab (Loucks et al., 2005).

Laut Steinbrich et al. (2016) sind die Eingangsparameter Niederschlag und Bodenfeuchte diejenigen Parameter, die bei einer ereignisbasierten Modellierung mit den höchsten Unsicherheiten behaftet sind. Aufgrund dessen beschränkt sich die Sensitivitätsanalyse in dieser Masterarbeit auf die Untersuchung des Einflusses dieser beiden Parameter auf das Modellergebnis. Es werden mehrere Modellläufe durchgeführt, bei denen beide Parameter nacheinander jeweils um 10 % erhöht bzw. reduziert werden und beide Parameter gleichzeitig um jeweils 10 % erhöht bzw. reduziert werden. Es wird angenommen, dass eine Veränderung von 10 % ein realistischer Toleranzbereich darstellt. Die Ergebnisse liefern eine Spannweite von maximalen Wasserständen, Fließgeschwindigkeiten und gesamtem Durchfluss an den einzelnen Schadstellen sowie Spannweiten der Abflussganglinien in den jeweiligen Einzugsgebieten.

In RoGeR können die beiden Parameter direkt in der Steuerungsdatei abgeändert werden, in dem der gewünschte Umrechnungsfaktor angegeben wird. Bei einer Erhöhung von 10 % wird der Umrechnungsfaktor auf 0.909 und bei einer Reduzierung von 10% auf 1.111 gesetzt. Dieses in RoGeR implementierte

Tool ermöglicht die gewünschte Anpassung einiger Eingangsparameter ohne Änderung der Eingangsrasterdatensätze, was die Modellierung effizienter gestaltet. Weitere Eingangsparameter, die auf diese Weise variiert werden können, sind beispielsweise die Bodentiefe oder die Länge der vertikal ausgerichteten Makroporen.

# 3.7 Modellevaluierung

Um bewerten zu können, wie gut das Modell RoGeR\_dyn die Auswirkungen des Starkregenereignisses vom 25.06.2016 in den beiden Einzugsgebieten Freiburg-Hochdorf und Benzhausen simulieren kann, werden die Modellergebnisse evaluiert. Die hohen Schäden in beiden Stadtgebieten wurden durch eine von dem Starkregenereignis hervorgerufene Sturzflut verursacht, die fernab von einem Gewässer zustande gekommen ist. Zur Modellevaluierung stehen aufgrund dessen keine beobachteten bzw. gemessenen Abflüsse zur Verfügung, mit denen die simulierte Abflussganglinie verglichen werden könnte. Zur Verfügung stehen Daten der Feuerwehr, die an der Mehrheit der Einsatzorte Informationen über die Wasserstände und -mengen protokolliert haben. Die Schadstellen können anhand von geographischen Koordinaten und nach Adressen räumlich dargestellt werden. Zusätzlich hilft Fotomaterial und Informationen über das Starkregenereignis, welche von Anwohnern, der Ortsverwaltung, dem örtlichen Amtsblatt, der Badischen Zeitung und dem Abteilungsleiter Herrn Heigold des Garten- und Tiefbauamtes Freiburg bereitgestellt werden. Anhand dieser Daten kann die räumliche Verteilung und das Maß der Überflutung in den Untersuchungsgebieten rekonstruiert und mit den Modellergebnissen verglichen werden.

Die Simulation des Oberflächenabflusses mit RoGeR\_dyn wird neben der räumlichen Verteilung auch an einzelnen Einsatzorten quantitativ bewertet. Zur Abschätzung der Plausibilität des modellierten Oberflächenabflusses wird die maximale Fließgeschwindigkeit und der maximale Abfluss auf den Straßen von verschiedenen Einsatzorten mittels der Kontinuitätsgleichung und der empirischen Fließformel von Gauckler-Manning-Strickler (Formel 4-6) unter Annahme einer stationär gleichförmigen Strömung berechnet. Hierfür werden die einzelnen Straßenquerschnitte bei der Ortsbegehung vermessen. Es wird jeweils ein rechteckiger Fließquerschnitt angenommen, der durch die Straßenbreite und Bordsteinhöhe charakterisiert wird. Das Gefälle der Straße wird anhand des DGM oder der LIDAR-Daten bestimmt. Als Rauigkeitsbeiwert wird ein Wert von 40 – 60 m<sup>1/3</sup>/s für asphaltierte Straße angenommen (Rodriguez und Guthörl, 2021). Die Berechnung des Abflusses, die unter Annahme eines rechteckigen Fließquerschnittes mit konstanter Wandrauigkeit erfolgt, ist als Annäherung an die Realität zu verstehen. Bei dem Starkregenereignis ist der Oberflächenabfluss stellenweise über die Bordsteinkanten geflossen und hat einen größeren Bereich als angenommen überschwemmt. Bei der Modellevaluierung muss berücksichtigt werden, dass sowohl die vereinfachte Durchflussberechnung mit der empirischen Fließformel von Manning-Strickler als auch die Modellergebnisse mit Unsicherheiten behaftet sind.

Zusätzlich werden die Starkregenmodellierungen mit dem Bemessungsniederschlag des 100-jährigen Niederschlagsereignis und veränderten Niederschlags- und Bodenvorfeuchtebedingungen durchgeführt, um zu untersuchen, inwiefern die Einzugsgebiete auf andere Bedingungen reagieren. Hierfür werden

die verschiedenen Ergebnisse mit den Ergebnissen der Ausgangssimulation verglichen. Aufgrund fehlender Messwerte wird die Plausibilität dabei optisch bewertet.

# 4. Ergebnisse

# 4.1 Auswahl der Stadtgebiete

Die Analyse und Eingrenzung der Feuerwehrdaten reduziert die insgesamt 351 Einträge auf 177 Feuerwehreinsätze, bei denen Sturm- und Unwetterschäden als Auslöser genannt sind. In Tabelle 4 ist die Anzahl der Feuerwehreinsätze nach Tag und Jahr aufgelistet. Einsätze an zwei oder drei aufeinanderfolgenden Tagen wurden zusammengefasst, da diese von demselben Niederschlagsereignis hervorgerufen wurden. Die Daten der Feuerwehr umfassen die Jahre 2015 – 2021, wobei Daten von den Jahren 2019 und 2020 nicht zur Verfügung gestellt wurden. Neben der zeitlichen Gliederung der Feuerwehreinsätze wurden die Einsatzorte räumlich in einem GIS dargestellt, um betroffene Stadtgebiete zu ermitteln.

Tabelle 4: Anzahl der Feuerwehreinsätze an verschiedenen Tagen der Jahre 2015 - 2021

	Jahr								
2015		2016		2017		2018		2021	
Datum	Anzahl	Datum	Anzahl	Datum	Anzahl	Datum	Anzahl	Datum	Anzahl
13.05-	31	17.04	10	10.07	2	03.01	4	29.06	7
15.05				11.07				30.06	
06.06	7	25.06	47	18.08	12	31.05	4		
12.06	15			12.11	25	23.09	6		
20.11	7								

Bei der Betrachtung der räumlichen Darstellung der Einsatztage ist besonders der 25.06.2016 mit insgesamt 47 Feuerwehreinsätzen aufgefallen, da sich, wie in Abbildung 4 zu sehen, der Großteil der Einsätze räumlich auf die Stadtgebiete Freiburg-Hochdorf und Freiburg-Benzhausen konzentriert. Davon fanden nur insgesamt 8 Feuerwehreinsätze in anderen Stadtteilen statt. Die Einsatzorte der anderen Einsatztage verteilen sich über die gesamte Stadt Freiburg, wobei sie sich in Gesamtansicht in den Stadtteilen Haslach, Stühlinger, Herdern und Zähringen über den betrachteten Zeitraum häufen. Die Begutachtung und Visualisierung der Niederschlagsdaten der jeweiligen Einsatztage an den beiden Stationen Freiburg Flugplatz und Freiburg WBI zeigt, dass an der Wetterstation Freiburg Flugplatz in der Nacht vom 24.06./25.06.2016 innerhalb weniger Stunden eine Niederschlagssumme von rund 50 mm aufgezeichnet wurde. Mit einer Niederschlagsintensität von 32 mm/h weist dieses Starkregenereignis die stärkste Niederschlagsintensität aller untersuchten Niederschlagsereignisse auf.

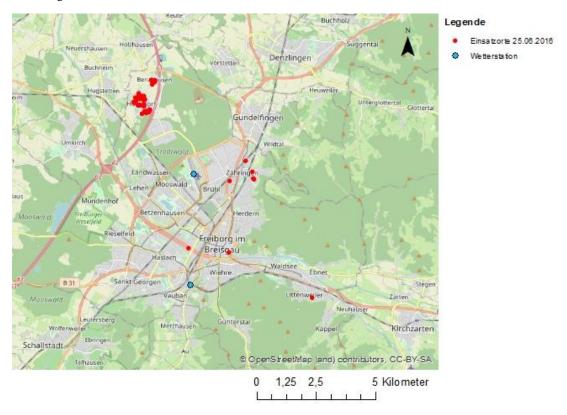


Abbildung 4: Feuerwehreinsätze am 25.06.2016

Aufgrund der hohen Anzahl an Feuerwehreinsätzen in den Stadtgebieten Freiburg-Hochdorf und Benzhausen am 25.06.2016, deren Einsatzursachen ausschließlich vollgelaufene Keller/Wohnungen oder überflutete Straßen waren, ausgelöst von dem Starkregenereignis in der Nacht vom 24.06./25.06.2016, wurden die Stadtgebiete Freiburg-Hochdorf und Benzhausen und das Starkregenereignis vom 24.06./25.06.2016 für die Starkregenmodellierungen und -analysen dieser Masterarbeit ausgewählt. Die Modellierungen der beiden nebeneinander liegenden Stadtgebiete werden separat durchgeführt und die Ergebnisse getrennt voneinander betrachtet.

## 4.2 Beschreibung der Einzugsgebiete

Das Stadtgebiet Freiburg-Hochdorf und dessen Ortsteil Benzhausen befinden sich im Nordwesten der Stadt Freiburg. Die Einzugsgebiete der Untersuchungsgebiete wurden so gewählt, dass alle bekannten Schadstellen abgedeckt sind. In Abbildung 5 sind die Einzugsgebiete der beiden Stadtteile mit ihrem Gebietsauslass, sowie die bekannten Einsatzorte der Feuerwehr und weitere bekannte Schadstellen dargestellt. Die weiteren bekannten Schadstellen resultieren aus Gesprächen mit Anwohnern bei der Ortsbegehung am 01.03.2022, einem Gespräch mit dem Abteilungsleiter des Garten- und Tiefbauamtes Freiburg Herrn Heigold und Kontakt mit der Ortsverwaltung Freiburg-Hochdorf.

Legende

Einsatz orte 25.06.2016

Weitere Schadensstellen
Hochdorf EZG
Hochdorf Gebietsauslass
Benzhausen EZG
Benzhausen Gebietsauslass
AWGN

0 0,25 0,5 1 Kilometer

Abbildung 5: Einzugsgebiete (EZG) der Stadtteile Freiburg-Hochdorf und Benzhausen und bekannte Schadstellen vom 25.06.2016

## Freiburg-Hochdorf

Das Stadtgebiet Freiburg-Hochdorf liegt im Nordwesten der Stadt Freiburg im Breisgau. Das Einzugsgebiet umfasst eine Größe von 1.54 km² und wird im Osten durch die Autobahn A5 abgegrenzt. Die Geländehöhe im Einzugsgebiet erstreckt sich von rund 206 bis 240 m. ü. M., wobei die mittlere Einzugsgebietshöhe bei etwa 216 m. ü. M. liegt. Das entspricht einer mittleren Hangneigung von 5.5 %. Die aus der Geländehöhe abgeleitete Hangneigung ist in Abbildung 6 veranschaulicht. Das höchste Gefälle im Einzugsgebiet ist im Norden und Nordosten zu lokalisieren.

Das AWGN der LUBW weist in dem Einzugsgebiet die Fließgewässer Brunnmatengraben, Hanfreezbach und NN-WV2 aus (siehe Abbildung 5). Im Osten an der Verdolung des Hanfreezbach unter der A5 fließt ein Teil des Wassers als Fließgewässer von Osten nach Westen in das Einzugsgebiet hinein und fließt mit dem von Süden nach Norden fließenden NN-WV2 Fließgewässer zusammen. Von dort verläuft das Fließgewässer als Hanfreezbach weiter nach Norden und fließt schließlich im Westen aus dem Einzugsgebiet hinaus in den nach March fließenden Mühlbach. Der Brunnmatengraben, der in der Ortsmitte von Osten nach Westen verläuft, fließt ebenfalls in den Hanfreezbach. Entlang des Brunnmatengrabens liegen fünf Kanalauslässe, die aufgenommenes Niederschlagswasser in das Fließgewässer ableiten. Bei der Ortsbegehung wurde festgestellt, dass der andere Teil, des von der Verdolung unter der

A5 fließenden Wassers, unterirdisch in Rohrleitungen ebenso dem Brunnmatengraben zufließt.

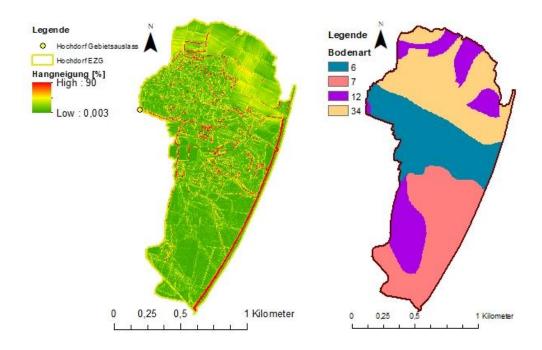


Abbildung 6: Hangneigung (links) und Oberbodenarten (rechts) des Einzugsgebietes Freiburg-Hochdorf

In Abbildung 7 sind die Landnutzung sowie die Versiegelungsgrade im Einzugsgebiet dargestellt. Im Einzugsgebiet dominieren die Landnutzungsklassen "Teilversiegelt" und "Wald", wobei "Laubwald", "Mischwald" und "Wald" zusammengefasst sind, mit einem Anteil von je 42 % bzw. 30 % an der Gesamtfläche. Rund 17 % des Einzugsgebietes werden als "Ackerland" genutzt und etwa 11 % werden als "Grünland" und "Gartenland" genutzt. Eine vollständige Versiegelung von 100 % befindet sich auf etwa 15 % der Einzugsgebietsfläche. Hierbei handelt es sich in erster Linie um Straßen und bebaute Flächen. Ein Großteil der teilversiegelten Fläche ist durch geringere Versiegelungsgrade charakterisiert. Beispielweise besitzen die große Tennis-Anlage, der Sportplatz und die Spielplätze Versiegelungsgrade von 28 %, 17 % bzw. 10 %. Rund 60 % der gesamten Einzugsgebietsfläche weist einen Versiegelungsgrad von weniger als 10 % auf. Bei gemeinsamer Betrachtung der Abbildung 7 fällt auf, dass das Gelände im Norden und Nordosten das höchste Gefälle besitzt, dort wo die Flächen landwirtschaftlich genutzt werden und an die teilversiegelte Fläche grenzen. Im Süden ist das Einzugsgebiet eher flach.

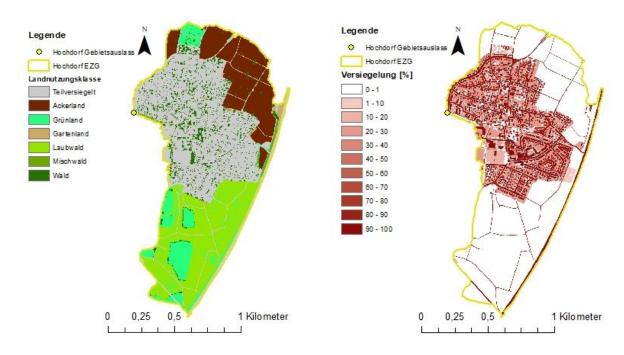


Abbildung 7: Landnutzung (links) und Versiegelungsgrade (rechts) im Einzugsgebiet Freiburg-Hochdorf

In Abbildung 6 (rechts) sind die Bodenarten des Einzugsgebietes abgebildet. RoGeR weist den verschiedenen Feinbodenklassen nach KA5 eigene Identifikationsnummern zu (Tabelle A. 2). Der Oberboden im Einzugsgebiet besteht zu 29 % aus mittel tonigem Schluff "Ut3" (Nr. 34), der sich hauptsächlich im Norden befindet. In der Mitte des Einzugsgebietes ist ein schwach sandiger Lehm "Ls2" (Nr. 6) mit einem Anteil von 25 % vorzufinden. 28 % des Einzugsgebietes besteht aus einem Oberboden aus mittel sandigem Lehm "Ls3" (Nr. 7), der einen Anteil von 28 % an der Gesamtfläche einnimmt. Schluffiger Lehm "Lu" (Nr. 12) ist vereinzelt im Norden, Süden und Westen des Einzugsgebietes vorzufinden und nimmt mit 18 % den kleinsten Anteil im Einzugsgebiet ein. Laut Weiler (2016) ist auf schluffigen Böden, wie sie vor allem im Norden des Einzugsgebietes auf den landwirtschaftlichen Flächen vorkommen, mit Verschlämmung zu rechnen. Diese geht vor allem mit einer Reduzierung der Infiltration und der Auswaschung von Feinmaterial einher. Nach Angaben des LGRB ist die Bodenerosionsgefährdung für das Starkregenrisikomanagement in dem Gebiet Freiburg-Hochdorf und Benzhausen mit einem Bodenabtrag > 3 t/ha im Jahr besonders hoch einzuschätzen.

Informationen über den Untergrund können aus der Geologischen Übersichtskarte (GÜK 300) und der Hydrogeologischen Karte (HK 50) im Kartenviewer des LGRB entnommen werden. Der Untergrund besteht aus Löss- und Verschwemmungssedimenten aus dem Quartär, deren Deckschicht durch sehr geringe Porendurchlässigkeit und mäßiger Ergiebigkeit gekennzeichnet ist. Da beide Untersuchungsgebiete direkt aneinandergrenzen, gilt dies für beide Einzugsgebiete.

In Abbildung 8 ist die räumliche Verteilung der Schadstellen in Freiburg-Hochdorf dargestellt. Die Schadstellen werden von Norden nach Süden nummeriert, um die Ergebnisse besser darstellen zu können.

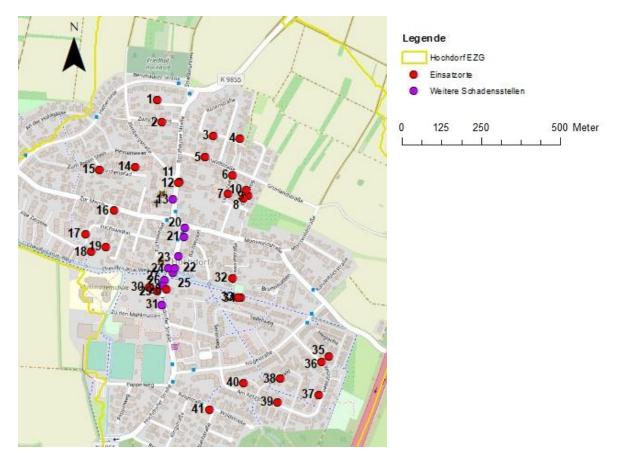


Abbildung 8: Schadstellen in Freiburg-Hochdorf

# Benzhausen

Benzhausen ist ein Ortsteil von Freiburg-Hochdorf, dessen Einzugsgebiet im Süden an das Einzugsgebiet von Hochdorf grenzt. Das Gebiet umfasst eine Größe von rund 0.5 km² und wird im Osten ebenfalls durch die Autobahn A5 abgegrenzt. Die Geländehöhe im Einzugsgebiet erstreckt sich von rund 203 bis 244 m. ü. M., wobei die mittlere Einzugsgebietshöhe bei etwa 217 m. ü. M. liegt. Die mittlere Hangneigung liegt bei 8.2 %. In Abbildung 9 ist die von den Geländehöhen abgeleitete Hangneigung veranschaulicht. Das Gelände ist im Süden, Südwesten und Südosten besonders steil, während es im Norden eher flach ist. Es wird deutlich, dass die maximale Einzugsgebietshöhe von 244 m. ü. M. direkt an der Grenze zwischen den beiden Einzugsgebieten erreicht wird.

Das AWGN der LUBW weist in dem Einzugsgebiet das Fließgewässer Eichmattenbächle aus, welches von Osten nach Nordwesten an dem Stadtgebiet Benzhausen vorbeifließt. Im Bereich der Hauptstraße und des Autobahnparkplatzes verläuft dieses unterirdisch in Rohrleitungen. Da das Gewässer im Bereich des Stadtgebietes unterirdisch verläuft und in keinen Zusammenhang mit einer bekannten Schadensmeldung steht, wird das Fließgewässer in der Starkregenmodellierung nicht weiter berücksichtigt.

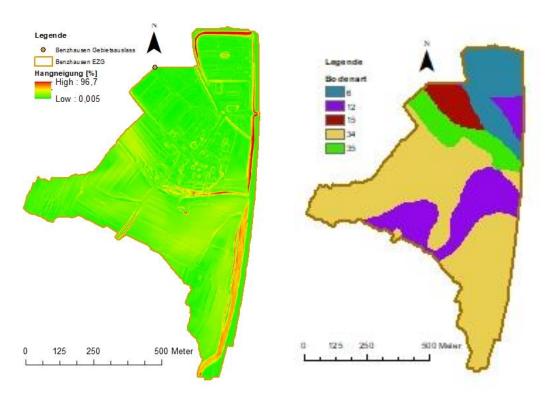


Abbildung 9: Hangneigung (links) und Oberbodenart (rechts) des Einzugsgebiet Benzhausen

Die Landnutzung und die Versiegelungsgrade im Einzugsgebiet sind in Abbildung 10 dargestellt. Mit einem Anteil von rund 47 % von der Gesamtfläche dominiert die Landnutzungsklasse "Ackerland" deutlich. Die teilversiegelte Fläche und die Landnutzungsklassen "Grünland" und "Gartenland" nehmen jeweils einen Anteil von 22 %, 14 % und 2 % ein. Die zusammengefassten Landnutzungen "Wald", "Laubwald" und "Mischwald" betreffen etwa 15 % des Einzugsgebietes. Vollständig versiegelt ist in etwa nur 8 % der Gesamtfläche. Dies betrifft vor allem die Straßen, Gebäude, den Autobahnparkplatz und die Autobahnmeisterei. 77 % der Gesamtfläche weist einen Versiegelungsgrad von weniger als 10 % auf. Bei gemeinsamer Betrachtung ist wie im Einzugsgebiet von Hochdorf ebenfalls zu erkennen, dass die landwirtschaftlich genutzten Flächen die höchsten Hangneigungen aufzeigen.

Die Bodenarten des Einzugsgebietes sind in Abbildung 9 (rechts) dargestellt. Mit einem Anteil von rund 54 % an der Gesamtfläche besteht der Oberboden im Einzugsgebiet aus tonigem Schluff "Ut3" (Nr. 34). In Richtung Norden ist der Oberboden durch stark tonigen Schluff "Ut4" (Nr. 35), stark lehmigen Sand "Sl4" (Nr. 15) und schwach sandigem Lehm "Ls2" (Nr. 6) charakterisiert. Im Norden, Süden und Osten des Einzugsgebietes ist teilweise ein schluffiger Lehm "Lu" (Nr. 12) vorzufinden. Da das Einzugsgebiet sehr stark durch die Landnutzungsklasse "Ackerland" geprägt ist und vor allem Böden mit hohen Anteilen an Schluff vorkommen, wird bei der Starkregenmodellierung von Benzhausen der Effekt der Verschlämmung berücksichtigt. Hierfür wird bei der Modellierung die Makroporendichte der vertikal ausgerichteten Makroporen reduziert.

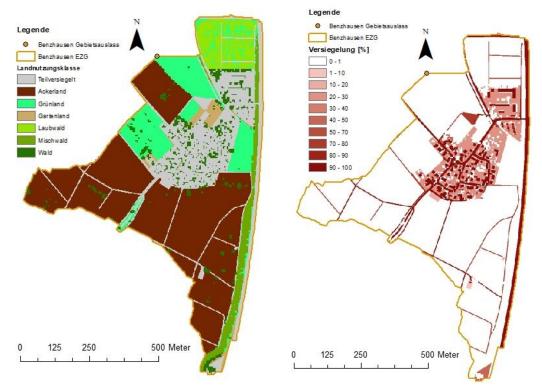


Abbildung 10: Landnutzung (links) und Versiegelungsgrad (rechts) des Einzugsgebiet Benzhausen

In Abbildung 11 ist die räumliche Verteilung der Schadstellen in Benzhausen dargestellt. Die Schadstellen werden von Süden nach Norden nummeriert, um die Ergebnisse besser darstellen zu können.

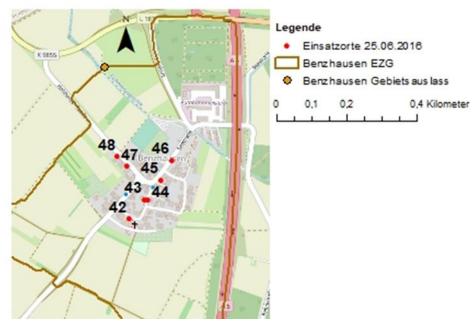


Abbildung 11: Schadstellen in Benzhausen

# 4.3 Beschreibung des Starkregenereignisses

Der Verlauf des Starkregenereignisses ist in Abbildung 12 veranschaulicht. Im Einzugsgebiet beginnt das Niederschlagsereignis am 24.06.2016 um 22:25 Uhr und endet am 25.06.2016 um 01:05 Uhr. Die Gesamtzeit des Niederschlagsereignisses beträgt somit 165 Minuten. Die Niederschlagssumme, ermittelt aus den 5-Minuten Niederschlagsradardaten, liegt bei rund 52 mm. An der Messstation des DWD am Flugplatz Freiburg wurde eine Niederschlagssumme von rund 50 mm aufgezeichnet. Laut KOSTRA-DWD 2010R tritt eine Niederschlagssumme von 53.3 mm in 120 Minuten statistisch alle 30 Jahre auf. Im Verlauf ist zu erkennen, dass sich die Niederschlagsfront von Südosten kommend nach Nordwesten ausbreitet. Mehrere konvektive Zellen verbinden sich über dem Hügel zwischen den beiden Einzugsgebietsgrenzen zum Zentrum einer Gewitterzelle. Die höchsten Niederschlagsintensitäten wurden in diesem Gebiet aufgenommen. Dass sich das Zentrum der Gewitterzelle direkt über den landwirtschaftlich genutzten Flächen des Hügels zwischen den beiden Ortsteilen gebildet hat, führte dazu, dass hohe Niederschlagsmengen in Verbindung mit Auswaschung von Feinmaterial in beide Einzugsgebiete geflossen sind. Der erste Feuerwehreinsatz wurde am 25.06.2016 um 00:58 Uhr gemeldet.

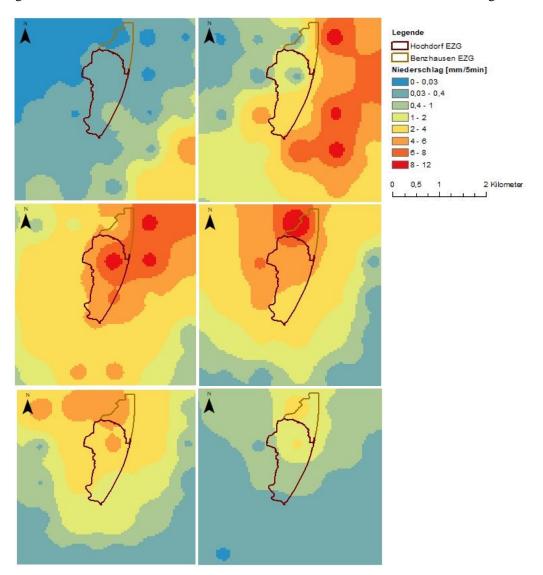


Abbildung 12: Verlauf des Starkregenereignis: (von links nach rechts) a) 22:25, b) 22:30, c) 22:35, d) 22:40, e) 22:45, f) 22:50

## 4.4 Ausgangsmodellierung

Simuliert wurde das Starkregenereignis, das am 25.05.2016 zu Überschwemmungen in dem Stadtteil Freiburg-Hochdorf und Benzhausen geführt hat.

## Freiburg-Hochdorf

In Abbildung 13 (links) ist die räumliche Variabilität des Oberflächenabflusses dargestellt, die mit Ro-GeR\_dyn simuliert wurde. Das Modell kombiniert die Basisversion von RoGeR mit einer 2D-hydraulischen Modellierung, die je Zeitschritt die von der Wassertiefe abhängige Fließgeschwindigkeit und Reinfiltration von Oberflächenabfluss berücksichtigt. Der gebildete Oberflächenabfluss besteht ausschließlich aus der Abflusskomponente HOA. In der Abbildung sind die Hauptfließwege des Oberflächenabflusses deutlich zu erkennen. Im Norden und Nordosten fließt der Abfluss von den landwirtschaftlich genutzten Hangflächen in das Wohngebiet, von wo er vor allem entlang der versiegelten Flächen (Straßen) abfließt. Der simulierte Oberflächenabfluss besteht ausschließlich aus der Abflusskomponente HOA.

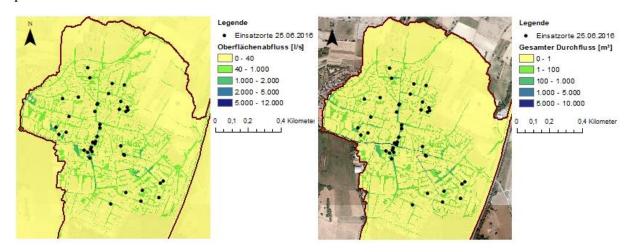


Abbildung 13: Simulierter Oberflächenabfluss (links) und gesamte Durchflussmengen (rechts) in Freiburg-Hochdorf

Für die Modellevaluierung ist besonders die Gesamtabflussmenge an den jeweiligen Einsatzorten interessant. Die von RoGeR\_dyn simulierte, kumulierte Oberflächenabflussmenge ist kritisch zu betrachten, da im dynamischen Modell die Abflussbildung vom Zeitschritt vorher in die Berechnung mit einbezogen wird. Besonders bei geringen Fließgeschwindigkeiten werden Abflussmengen dadurch möglicherweise mehrfach berücksichtigt und führen zu ungenauen Gesamtabflussmengen. Aufgrund dessen wurde ein neuer Ergebnisparameter in das Modell implementiert, der unter Berücksichtigung der Fließgeschwindigkeit errechnet, wie viel Wasser je Zeitschritt in eine Rasterzelle hinein- bzw. hinausfließt und dieses Wasservolumen aufsummiert. Der Ergebnisparameter "Total Fluss" stellt somit die Durchflussmenge dar, die insgesamt während des Starkregenereignisses durch die einzelnen Rasterzellen geflossen ist. Die in Abbildung 13 (rechts) dargestellte räumliche Variabilität der gesamten Durchflussmengen zeigt ebenfalls, wo sich die Hauptfließwege gebildet haben. Die kleineren Fließwege entlang der Ackerflächen werden dabei nicht abgebildet. Es ist erkennbar, dass sich das oberflächlich

abfließende Wasser vor allem entlang der Straßen konzentriert. Von dort kann das Wasser je nach örtlicher Begebenheit zu den Schadstellen fließen und dort in tiefergelegenen Kellern Schäden verursachen. An allen Straßen der Einsatzorte wurden Durchflussmengen von mindestens 10 m³ simuliert. Lediglich an drei Einsatzorten (Nr. 1, 14 und 19) wurde ein gesamter Durchfluss von nur 3 m³ modelliert. Auffällig sind die hohen gesamten Durchflussmengen von bis zu knapp 1000 m³ entlang der Hauptstraße Benzhauserstraße und Hochdorferstraße, die mit einer Häufung der Feuerwehreinsätze einhergehen.

#### Benzhausen

In Abbildung 14 (links) ist die räumliche Variabilität des von RoGeR\_dyn simulierten Oberflächenabfluss dargestellt. Der Oberflächenabfluss besteht in diesem Untersuchungsgebiet ebenfalls ausschließlich aus der Abflusskomponente HOA. Der Oberflächenabfluss fließt von den landwirtschaftlich genutzten Hangflächen aus Richtung Süden und Nordwesten in das Wohngebiet. Der Abfluss konzentriert sich vor allem auf den Straßen, fließt aber auch im Osten und Westen des Einzugsgebietes an den Wohnhäusern vorbei. Im Norden im Bereich des gewählten Gebietsauslasses (brauner Punkt) werden die höchsten Oberflächenabflüsse modelliert, wobei die simulierten gesamten Durchflussmengen (Abbildung 14, rechts) geringe Mengen zeigen. Das Einzugsgebiet wurde im Osten durch die Autobahn A5 abgegrenzt und folgt nicht dem natürlichen Wassereinzugsgebiet. Zudem ist im Bereich des Gebietsauslasses das Gelände sehr flach und durch kleinräumige Oberflächenstrukturen beeinflusst, sodass sich das Wasser an der Stelle aufstaut und nicht abläuft. Der modellierte Oberflächenabfluss an der Einzugsgebietsgrenze ist daher kritisch zu betrachten.

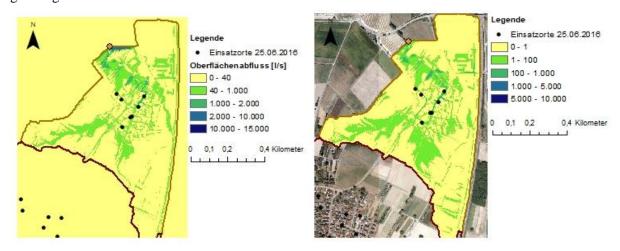


Abbildung 14: Simulierter Oberflächenabfluss (links) und gesamte Durchflussmenge (rechts) in Benzhausen

Die in Abbildung 14 (rechts) dargestellte räumliche Variabilität der gesamten Durchflussmenge zeigt ebenfalls, wo sich die Hauptfließwege gebildet haben. Vor allem auf den Ackerflächen ist zu beobachten, dass ein größerer Bereich durchflossen wird, als in Abbildung 14 (links) erkennbar ist. Entlang der Straßen konzentriert sich das oberflächlich abfließende Wasser und fließt Richtung Norden an den Gebietsauslass. Alle Einsatzorte liegen auf den Hauptfließpfaden, an denen gesamte Durchflussmengen

von mindestens 200 m³ simuliert werden. Im Bereich des Gebietsauslasses ist erkennbar, dass auf der als Grünland genutzten Fläche hohe Durchflussmengen modelliert werden.

## 4.5 Kanalisation

#### Freiburg-Hochdorf

In Freiburg-Hochdorf ist eine Trennkanalisation vorhanden, die Schmutz- und Niederschlagswasser jeweils in separaten Kanalrohren abführt. Das Abwasser wird in die nächstgelegene Kläranlage abgeleitet, während das Niederschlagswasser teilweise direkt oder über den Brunnenmatgraben in das Regenrückhaltebecken westlich von Freiburg-Hochdorf gelangt. In Abbildung 15 ist die Lage der Einsatzorte, Kanalschächte, Straßeneinläufe und der Kanalauslässe in den Brunnenmatgraben in Freiburg-Hochdorf dargestellt. Abgebildet sind nur die Straßeneinläufe, bei denen nach Berechnung mit der Formel von Kemper (2018) während des Niederschlagsereignisses auch Wasser aufgenommen werden konnte. Eine vollständige Überströmung der Straßeneinläufe wurde bei den Untersuchungen nicht beachtet.

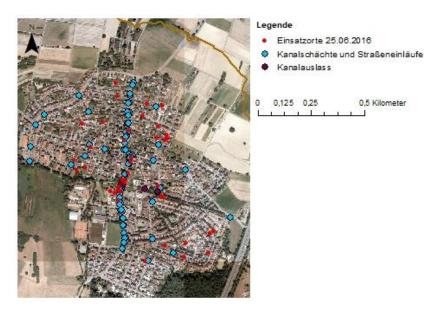


Abbildung 15: Lage der Einsatzorte, Kanalschächte, Straßeneinläufe und Kanalauslässe im Einzugsgebiet Freiburg-Hochdorf

Die modellierte Abflussganglinie am Gebietsauslass des Einzugsgebietes Freiburg-Hochdorf mit und ohne Einfluss der Kanalisation ist in Abbildung 16 dargestellt. Darüber hinaus sind die 5 Minuten-Niederschlagssummen des Einzugsgebietes abgebildet. Der Zeitraum von 200 Minuten nach Beginn des Niederschlagsereignisses umfasst die Uhrzeit von 22:25 Uhr bis 01:45 Uhr am 24.06./25.06.2016. Etwa 50 Minuten nach Beginn des Niederschlagsereignisses erreichen beide Abflussganglinien ihr Maximum mit Werten von rund 1300 l/s bzw. 900 l/s. Die Berücksichtigung der Kanalisation führt zur Ausbildung eines niedrigeren Hochwasserscheitels, der zusätzlich schneller abnimmt. Der ereignisbezogene Abflussbeiwert der Ausgangssimulation beträgt 0.12, während sich dieser durch Einbeziehung der Kanalisation auf 0.08 verringert. Der Abflussbeiwert ist der Quotient aus der Wassermenge, die über einen

festgelegten Zeitraum abfließt, und der zeitlich und räumlich zugehörigen Niederschlagsmenge. Die dimensionslose Kennzahl kann einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen. Große Werte deuten dabei an, dass ein Großteil des Niederschlags abfließt und wenig im Einzugsgebiet zurückgehalten wird (Bronstert, 2016). Der kleine Abflusswert besagt, dass nur ein sehr geringer Anteil des Niederschlags das Einzugsgebiet am Gebietsauslass verlässt. Der Großteil der Niederschlagsmenge verbleibt im Einzugsgebiet, infiltriert oder verdunstet. Durch die Einbeziehung der Kanalisation wird Niederschlagswasser an bestimmten Stellen aufgenommen und an anderen Stellen wieder dem Gerinne zugeführt. Teilweise wird das Wasser allerdings auf anderem Wege aus dem Einzugsgebiet abgeführt. Aufgrund dessen ist der kleinere Abflussbeiwert zu erklären.

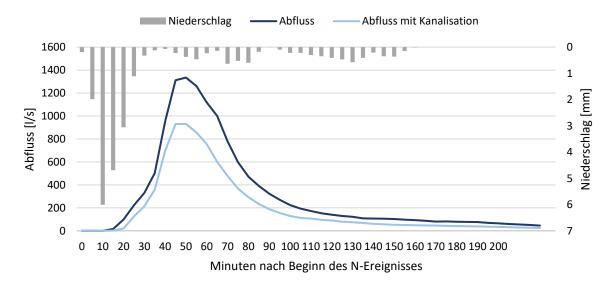


Abbildung 16: Simulierte Abflussganglinie am Gebietsauslass in Freiburg-Hochdorf mit und ohne Berücksichtigung der Kanalisation

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Starkregenmodellierung mit und ohne Einfluss der Kanalisation vorgestellt. Hierfür werden die maximalen Wasserstände, die maximalen Fließgeschwindigkeiten und der gesamte Durchfluss an den einzelnen Schadstellen, sowie deren Abweichungen dargestellt. Für die Analyse der Ergebnisse wurde um die Schadstellen jeweils eine Pufferzone von 10 m angelegt, um mehrere mögliche Fließwege abzudecken. Die Nummerierung der Einsatzorte orientiert sich nach der in Abbildung 8 dargestellten Zuordnung.

In Abbildung 17 und 18 sind die maximalen Wasserstände, die an den einzelnen Schadstellen simuliert wurden, jeweils ohne und mit Einfluss der Kanalisation und deren absolute Abweichung abgebildet. Auffallend ist, dass die höchsten maximalen Wasserstände entlang der Hauptstraße Hochdorferstraße (Einsatzorte 20 – 31) simuliert wurden. Maximale Wasserstände von über 10 cm wurden außerdem an den Einsatzorten 11, 13, 15, 33 und 34 erreicht. Diese befinden sich entlang der Hauptstraße Benzhauserstraße im Norden des Stadtgebietes, im Nordwesten und entlang des Brunnmatengrabens. Wie zu erwarten, führt die Einbeziehung der Kanalisation beim Großteil der Schadstellen zu einer Verringerung der maximalen Wasserstände. Die höchsten absoluten Abweichungen der simulierten maximalen

Wasserstände sind im Bereich der Hauptstraße Hochdorferstraße vorzufinden. Neben dem Einfluss der Aufnahme von Niederschlag von einzelnen Kanalschächten, wurde in diesem Bereich auch die Aufnahme von Niederschlag von den Straßeneinläufen berücksichtigt. An mehreren Schadstellen ist kein Einfluss der Kanalisation festzustellen. Zurückzuführen ist dies auf die Verteilung der Kanalschächte im Einzugsgebiet (Abbildung 15). An den beiden Einsatzorten 18 und 31 ist sogar eine Erhöhung der maximalen Wasserstände von 3 cm bzw. 4 cm aufgetreten.

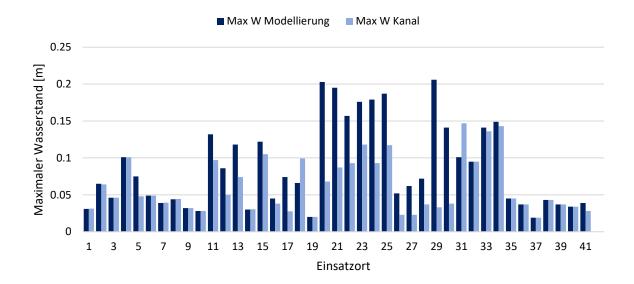


Abbildung 17: Simulierte maximale Wasserstände an den Schadstellen in Freiburg-Hochdorf mit und ohne Berücksichtigung der Kanalisation



Abbildung 18: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Wasserstände der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf zwischen der Ausgangsmodellierung und der Modellierung mit Berücksichtigung der Kanalisation

Die simulierten maximalen Fließgeschwindigkeiten an den einzelnen Einsatzorten ohne und mit Einfluss der Kanalisation und deren absolute Abweichung sind in Abbildung 19 und 20 dargestellt. An Einsatzort 20 und 21 wurden die höchsten maximalen Fließgeschwindigkeiten mit knapp 2.5 m/s simuliert. Weitere Einsatzorte entlang der beiden Hauptstraßen Hochdorferstraße und Benzhauserstraße zeigen hohe maximale Fließgeschwindigkeiten von bis zu 1.6 m/s. Das Säulendiagramm, das die absolute Abweichung der maximalen Fließgeschwindigkeit je Einsatzort von der Modellierung mit und ohne Berücksichtigung der Kanalisation darstellt, zeigt ein ähnliches Muster wie die simulierten maximalen Wasserstände. Eine Reduzierung oder keine Veränderung der maximalen Fließgeschwindigkeiten ist beim Großteil der Einsatzorte festzustellen, während an Einsatzort 20 und 31 wiederum eine Erhöhung um 0.8 m/s bzw. 0.3 m/s zu beobachten ist.

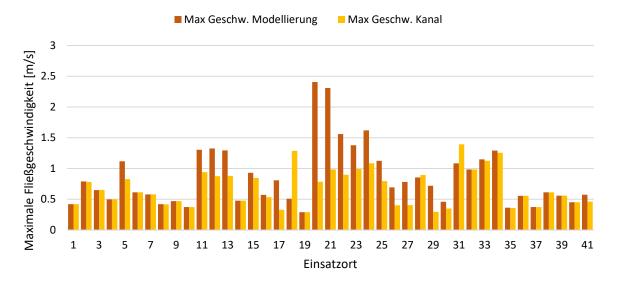


Abbildung 20: Simulierte maximale Fließgeschwindigkeiten an den Schadstellen in Freiburg-Hochdorf mit und ohne Berücksichtigung der Kanalisation

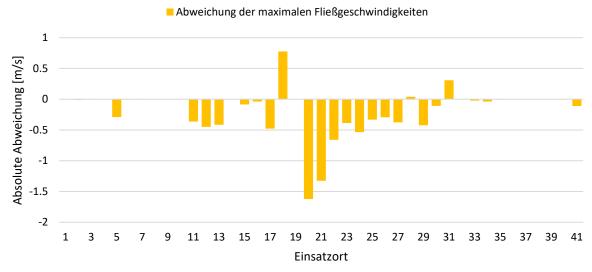


Abbildung 19: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Fließgeschwindigkeiten der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf zwischen der Ausgangsmodellierung und der Modellierung mit Berücksichtigung der Kanalisation

Der Ergebnisparameter "Total\_Fluss" stellt ein aufsummiertes Wasservolumen dar. Unter Berücksichtigung der Fließgeschwindigkeit wird errechnet wie viel Wasser pro Zeitschritt in eine Rasterzelle hinein- bzw. hinausfließt. Das Wasservolumen, welches eine Rasterzelle pro Zeitschritt durchfließt, wird aufsummiert und im Ergebnisparameter "Total\_Fluss" dargestellt. Die Ergebnisse dieses Parameters der Modellierung ohne und mit Einbeziehung der Kanalisation je Einsatzort sind in Abbildung 21 dargestellt. Auffallend ist, dass die höchsten Gesamtdurchflüsse entlang der beiden Hauptstraßen Benzhauserstraße (Einsatzort 11 - 13) und Hochdorferstraße (Einsatzort 20 - 31) auftreten. Wie in Abbildung 22 zu sehen, ist an diesen Stellen auch die absolute Abweichung zwischen der Modellierung mit und ohne Einfluss der Kanalisation auffallend hoch. Der Einfluss der Kanalisation führt an keinem der Einsatzorte zu einem höheren Gesamtdurchfluss. An einigen Einsatzorten im Norden, Nordosten, Nordwesten und Süden des Untersuchungsgebietes ist kein Einfluss der Kanalisation auf den gesamten Durchfluss zu erkennen.

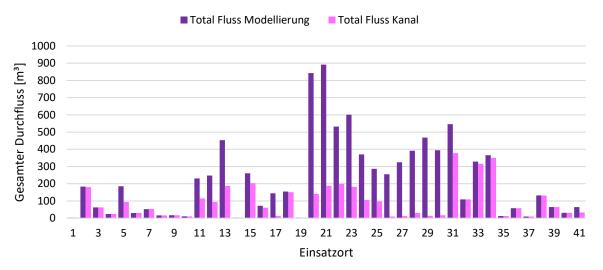


Abbildung 21: Simulierte gesamte Durchflussmengen an den Schadstellen in Freiburg-Hochdorf mit und ohne Berücksichtigung der Kanalisation

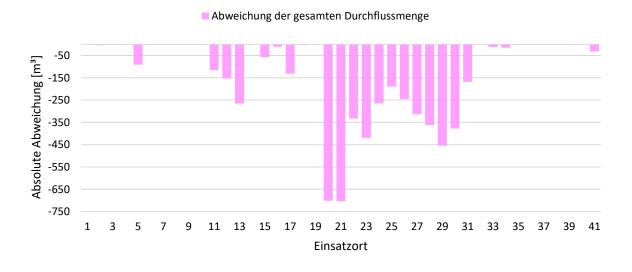


Abbildung 22: Absolute Abweichung der simulierten gesamten Durchflussmengen der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf zwischen der Ausgangsmodellierung und der Modellierung mit Berücksichtigung der Kanalisation

Um die Ergebnisse der Starkregenmodellierungen mit und ohne Einfluss der Kanalisation besser einordnen zu können, ist in Tabelle 5 jeweils der Anteil der Einsatzorte dargestellt, die einen bestimmten Schwellenwert überschreiten. Dabei werden die maximalen Wasserstände, maximalen Fließgeschwindigkeiten und der gesamte Durchfluss betrachtet. Die Einbeziehung der Kanalisation in die Starkregenmodellierung führt dazu, dass sich die maximalen Wasserstände und die maximalen Fließgeschwindigkeiten an den Einsatzorten im Schnitt verringern und ebenfalls weniger Gesamtdurchfluss an den Einsatzorten simuliert wird. So werden an etwa 7 zusätzlichen Einsatzorten geringere maximale Wasserstände von 5 cm modelliert und rund 2 Einsatzorte weniger zeigen einen maximalen Wasserstand von 20 cm. An ungefähr 8 Einsatzorten hat sich die maximale Fließgeschwindigkeit auf weniger als 1 m/s verringert und an etwa 13 Einsatzorten ist der gesamte Durchfluss auf weniger als 200 m³ gesunken.

Tabelle 5: Veränderung der maximalen Wasserstände, maximalen Fließgeschwindigkeiten und gesamten Durchflussmengen durch die Berücksichtigung der Kanalisation an den Einsatzorten in Freiburg-Hochdorf

	Anteil der Einsatzorte	Anteil der Einsatzorte		
	Modellierung ohne Einfluss der	Modellierung mit Einfluss der		
	Kanalisation	Kanalisation		
	[%]	[%]		
<b>Maximaler Wasserstand</b>				
[m]				
< 0.05	41.5	58.5		
0.05 - 0.2	51.2	39.0		
> 0.2	7.3	2.5		
Maximale Fließge-				
schwindigkeit [m/s]				
< 1	68.3	87.8		
1 - 3	31.7	12.2		
Gesamter Durchfluss				
[m <sup>3</sup> ]				
< 200	56.1	87.8		
> 200	43.9	12.2		

## Benzhausen

In Benzhausen ist eine Mischkanalisation vorhanden, die Schmutz- und Niederschlagswasser gemeinsam in einem Kanalrohr abführt. Lediglich vom Platz der Autobahnmeisterei führt ein Kanalrohr, welches Niederschlagswasser aufnimmt und in das Eichmattenbächle leitet. In Abbildung 23 ist die Lage der Einsatzorte, der Kanalschächte und der Straßeneinläufe in Benzhausen dargestellt. Auch hier sind nur die Straßeneinläufe dargestellt, die laut den Berechnungen während des Niederschlagsereignisses

unter Beachtung der Straßengeometrie, Niederschlag aufgenommen haben. Auch hier wurde eine vollständige Überströmung der Straßeneinläufe nicht weiter untersucht.

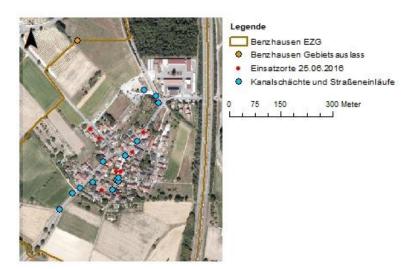


Abbildung 23: Lage der Einsatzorte, Kanalschächte, Straßeneinläufe und Kanalauslässe im Einzugsgebiet Benzhausen

Die modellierte Abflussganglinie am Gebietsauslass des Einzugsgebietes Benzhausen mit und ohne Einfluss der Kanalisation ist in Abbildung 24 dargestellt. Darüber hinaus sind die 5 Minuten-Niederschlagssummen des Einzugsgebietes abgebildet. Der Zeitraum von 200 Minuten nach Beginn des Niederschlagsereignisses umfasst die Uhrzeit von 22:25 Uhr bis 01:45 Uhr am 24.06./25.06.2016. Die Abflussganglinie am Gebietsauslass zeigt nur sehr geringe Abflussmengen an, sodass der Einfluss der Kanalisation bei Betrachtung der Abflussganglinie nicht wahrnehmbar ist. Die Abflussspitze mit einem Wert von 0.007 l/s wird unmittelbar 15 Minuten nach Beginn des Niederschlagsereignisses erreicht. Der Abflussbeiwert der Ausgangssimulation liegt bei 0.03. Das bedeutet, dass nahezu die gesamte Niederschlagsmenge im Einzugsgebiet verbleibt, infiltriert oder verdunstet. Überraschend ist dies nicht, denn lediglich 22 % der Einzugsgebietsfläche ist teilversiegelt. Die restlichen Flächen weisen hohe Infiltrationskapazitäten auf. Der Abflussbeiwert durch Berücksichtigung der Kanalisation verringert sich auf 01. Die sehr geringen Abflussmengen können durch die hohen Infiltrationsmengen auf den Grünflächen vor dem Gebietsauslass erklärt werden und mit den in Kapitel 4.4 beschriebenen Begebenheiten.

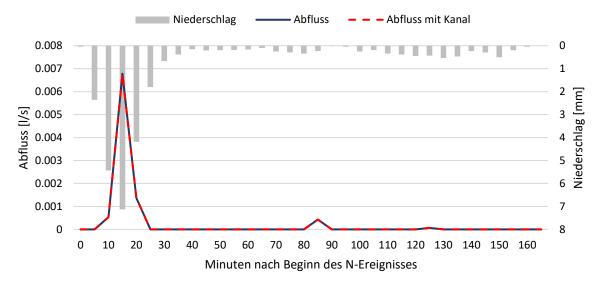


Abbildung 25: Simulierte Abflussganglinie am Gebietsauslass in Benzhausen mit und ohne Berücksichtigung der Kanalisation

In Abbildung 25 sind die maximalen Wasserstände, die an den einzelnen Schadstellen simuliert wurden, jeweils ohne und mit Einfluss der Kanalisation abgebildet. Der höchste maximale Wasserstand wurde an Einsatzort 46 simuliert. Die Besonderheit dieses Einsatzortes ist, dass es sich um keinen Schadensfall in einem Gebäude handelt, sondern dort die gesamte Seestraße überflutet und mit Schlamm überdeckt war. Durch die Berücksichtigung der Kanalisation hat sich der maximale Wasserstand um knapp 4 cm verringert. An Einsatzort 45, welcher sich auch in der Seestraße befindet, hat sich durch Einbeziehung der Kanalisation der maximale Wasserstand am stärksten verändert mit einer Verringerung von 15 cm. Die Einsatzorte 43 und 44 liegen direkt gegenüber voneinander, zeigen aufgrund der Straßenneigung allerdings unterschiedliche maximale Wasserstände mit Werten von ca. 9 cm bzw. 19 cm auf. Auch hier werden die maximalen Wasserstände durch die Einbeziehung der Kanalisation beeinflusst. Die absolute Abweichung beträgt jeweils 7 cm, während die relative Abweichung an Einsatzort 43 rund 73 % beträgt und an Einsatzort nur 35 %. Die maximalen Wasserstände der Einsatzorte 42, 47 und 48, die sich im Süden und Nordwesten des Einzugsgebietes befinden, sind durch die Berücksichtigung der Kanalisation nicht beeinflusst.

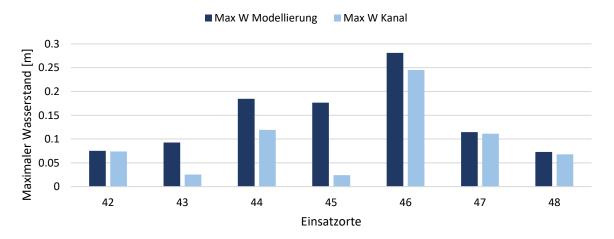


Abbildung 24: Simulierte maximale Wasserstände an den Schadstellen in Benzhausen mit und ohne Berücksichtigung der Kanalisation

Die simulierten maximalen Fließgeschwindigkeiten an den einzelnen Einsatzorten ohne und mit Einfluss der Kanalisation sind in Abbildung 26 dargestellt. Die Starkregenmodellierung ohne Berücksichtigung der Kanalisation simuliert an den Einsatzorten maximale Fließgeschwindigkeiten von rund 0.9 m/s bis knapp 2 m/s, wobei die höchsten maximalen Fließgeschwindigkeiten entlang der Seestraße auftreten. Auffällig ist, dass sich die maximale Fließgeschwindigkeit an Einsatzort 46 durch Einbeziehung der Kanalisation erhöht, während sie sich an Einsatzort 45 deutlich verringert. Wie bei den simulierten maximalen Wasserständen zeigen die simulierten maximalen Fließgeschwindigkeiten an den Einsatzorte 42, 47 und 48 kaum eine Veränderung.

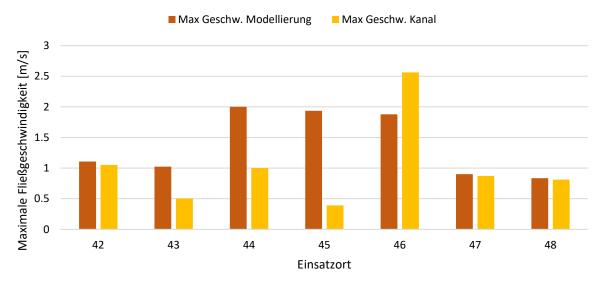


Abbildung 26: Simulierte maximale Fließgeschwindigkeiten an den Schadstellen in Benzhausen mit und ohne Berücksichtigung der Kanalisation

Der simulierte gesamte Durchfluss an den Einsatzorten ohne und mit Einbeziehung der Kanalisation ist in Abbildung 27 dargestellt. Besonders auffällig ist der simulierte gesamte Durchfluss an Einsatzort 46, der nach Berücksichtigung der Kanalisation eine Erhöhung von rund 4700 m³ zeigt. Auch an der zweiten Einsatzstelle in der Seestraße (Einsatzort 45) ist unter Einbeziehung der Kanalisation eine Erhöhung der gesamten Durchflussmenge von 270 m³ zu beobachten. An den anderen Einsatzorten liegt der gesamte Durchfluss bei bis zu 220 m³, was mit den Ergebnissen der Starkregenmodellierung von Freiburg-Hochdorf vergleichbar ist.

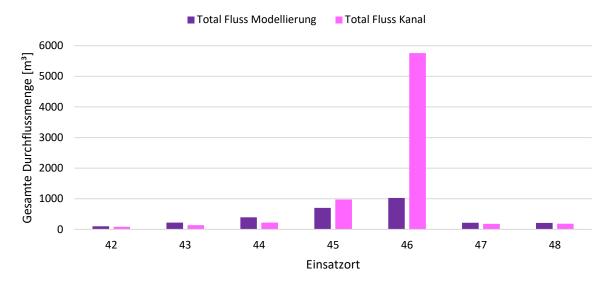


Abbildung 27: Simulierte gesamte Durchflussmengen an den Schadstellen in Benzhausen mit und ohne Berücksichtigung der Kanalisation

Um die Ergebnisse der Starkregenmodellierungen mit und ohne Einfluss der Kanalisation besser einordnen zu können, ist in Tabelle 6 jeweils der Anteil der Einsatzorte dargestellt, die einen bestimmten
Schwellenwert überschreiten. Dabei werden die maximalen Wasserstände, maximalen Fließgeschwindigkeiten und der gesamte Durchfluss betrachtet. Die Einbeziehung der Kanalisation in die Starkregenmodellierung führt auch hier dazu, dass sich die maximalen Wasserstände und die maximalen Fließgeschwindigkeiten an den Einsatzorten im Schnitt verringern und ebenfalls weniger Gesamtdurchfluss an
den Einsatzorten simuliert wird. So wird an einem Einsatzort mehr ein geringerer maximaler Wasserstand von 10 cm simuliert, sowie an einem Einsatzort mehr eine geringere maximale Fließgeschwindigkeit von 1 m/s erreicht. Durch die Berücksichtigung der Kanalisation ist an drei zusätzlichen Einsatzorten der gesamte Durchfluss auf weniger als 200 m³ gesunken.

Tabelle 6: Veränderung der maximalen Wasserstände, maximalen Fließgeschwindigkeiten und gesamten Durchflussmengen durch die Berücksichtigung der Kanalisation an den Einsatzorten in Benzhausen

	Anteil der Einsatzorte	Anteil der Einsatzorte		
	Modellierung ohne Einfluss	Modellierung mit Einfluss der		
	der Kanalisation	Kanalisation		
	[%]	[%]		
Maximaler Wasserstand				
[m]				
< 0.1	43	57		
0.1 - 0.2	43	29		
> 0.2	14	14		
Maximale Fließge-				
schwindigkeit [m/s]				
< 1	71	57		
1 – 3	29	43		

Gesamter Durchfluss		
$[m^3]$		
< 200	14	57
> 200	86	43

# 4.6 100-jähriges Niederschlagsereignis

Durch die Starkregenmodellierungen mit verändertem Niederschlagsinput und ansonsten unveränderten Eingangsdaten, wird untersucht, wie das Einzugsgebiet unter gleichen Voraussetzungen auf höhere Niederschlagmengen und -intensitäten reagiert hätte. Dafür wird als Niederschlagsinput das 100-jährige Niederschlagsereignis für die Region verwendet. Aus den Daten des KOSTRA-DWD 2010R ergibt sich für ein 165 Minuten andauerndes Ereignis eine Niederschlagssumme von rund 68 mm, die anhand von unterschiedlichen Intensitätsverteilungen über die Zeit verteilt werden. Die 5-Minuten Niederschlagsradardaten des Starkregenereignisses zeigen über die Dauer von 165 Minuten eine Niederschlagssumme von 52 mm.

#### Freiburg-Hochdorf

In Abbildung 28 sind die simulierten maximalen Wasserstände an den einzelnen Einsatzorten aus den verschiedenen Starkregenmodellierungen dargestellt. Auffällig ist, dass die maximalen Wasserstände an einzelnen Einsatzorten entlang der Hauptstraße Benzhauserstraße und Hochdorferstraße Werte von bis zu 1.1 m annehmen. Im Vergleich dazu liegen die höchsten maximalen Wasserstände der Modellierung mit den 5-Minuten Niederschlagsradardaten des Starkregenereignisses bei 0.2 m. Die mitten- und endbetonte Intensitätsverteilung des 100-jährigen Niederschlagsereignisses führt zu ähnlichen Ergebnissen, während die anfangsbetonte Intensitätsverteilung im Gegensatz dazu eher niedrigere maximale Wasserstände verursacht.

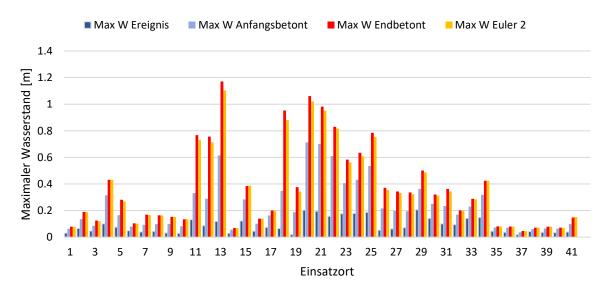


Abbildung 28: Simulierte maximale Wasserstände an den Einsatzorten in Freiburg-Hochdorf beim 100-jährigen Niederschlagsereignis mit verschiedenen Intensitätsverteilungen

Abbildung 29 zeigt die absolute Abweichung der simulierten maximalen Wasserstände der verschiedenen Starkregenmodellierung, wobei die Modellierung mit den 5-Minuten Niederschlagsradardaten des Starkregenereignisses die Grundlage bildet. Die Einsatzorte im Norden des Einzugsgebietes zeigen mit einer Zunahme von bis zu 0.1 m die geringsten Abweichungen der maximalen Wasserstände. Im Süden und Südwesten weichen die simulierten maximalen Wasserstände aus den verschiedenen Starkregenmodellierungen um bis zu 0.35 m von den Ergebnissen der Modellierung des Starkregenereignisses ab. Entlang der Hauptstraße Benzhauserstraße und Hochdorferstraße sind die höchsten Abweichungen mit Werten von bis zu 1 m zu beobachten.

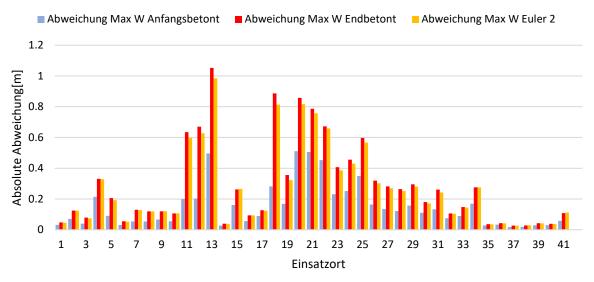


Abbildung 29: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Wasserstände der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf zwischen der Ausgangsmodellierung und den verschiedenen Intensitätsverteilungen des 100-jährigen N-Ereignisses

In Abbildung 30 ist die absolute Abweichung des simulierten gesamten Durchflusses an den einzelnen Einsatzorten aus den verschiedenen Starkregenmodellierungen von den Ergebnissen der Modellierung mit den 5-Minuten Niederschlagsradardaten veranschaulicht. Bei diesen Ergebnissen zeigt sich das gleiche räumliche Muster, wie bei den Ergebnissen der simulierten maximalen Wasserstände. Die höchsten Abweichungen sind ebenfalls bei den Einsatzorten entlang der Hauptstraße Benzhauserstraße und Hochdorferstraße mit absoluten Abweichungen von bis zu 10 000 m³ zu beobachten.

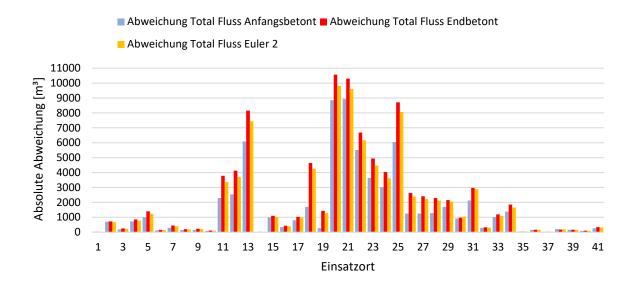


Abbildung 30: Absolute Abweichung der simulierten gesamten Durchflussmengen der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf zwischen der Ausgangsmodellierung und den verschiedenen Intensitätsverteilungen des 100-jährigen N-Ereignisses

#### Benzhausen

In Abbildung 31 ist die absolute Abweichung der simulierten maximalen Wasserstände der verschiedenen Starkregenmodellierungen von den Ergebnissen der Starkregenmodellierung mit den unveränderten Eingangsparametern je Einsatzort dargestellt. Auffällig ist, dass die Starkregenmodellierung des 100jährigen Niederschlagsereignisses mit der mitten- und endbetonten Intensitätsverteilung die gleichen Ergebnisse liefert. Lediglich die anfangsbetonte Intensitätsverteilung führt zu geringeren Abweichungen der maximalen Wasserstände von der Ausgangsmodellierung. An Einsatzort 44 steigen die simulierten maximalen Wasserstände des 100-jährigen Niederschlagsereignisses um bis zu knapp 60 cm an. Allgemein reagieren die maximalen Wasserstände der Einsatzorte entlang des St. Agatha-Weges (Einsatzort 43 und 44), der in die Seestraße (Einsatzort 45 und 46) mündet, stärker auf das 100-jährige Niederschlagsereignis als die Einsatzorte im Süden und Nordwesten (Einsatzort 42, 47 und 48). Das gleiche räumliche Muster ist zu erkennen, wenn man die absolute Abweichung der gesamten Durchflussmengen der verschiedenen Starkregenmodellierungen betrachtet (siehe Abbildung 32). Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Abweichungen des gesamten Durchflusses zunehmen, wenn man sich Richtung Norden von Einsatzort 43 – 46 bewegt. Interessant ist, dass die anfangsbetonte Intensitätsverteilung an Einsatzort 46 zu der höchsten Zunahme der gesamten Durchflussmenge führt, während sich der maximale Wasserstand im Vergleich zu den anderen Intensitätsverteilungen nicht so stark ändert. Die absolute Veränderung der gesamten Durchflussmenge der verschiedenen Starkregenmodellierungen variiert an den einzelnen Einsatzorten zwischen 500 m³ und knapp 4500 m³.

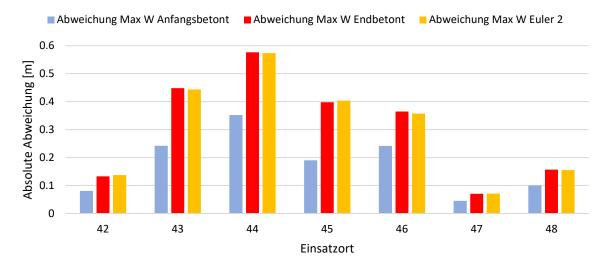


Abbildung 32: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Wasserstände der Einsatzstellen in Benzhausen zwischen der Ausgangsmodellierung und den verschiedenen Intensitätsverteilungen des 100-jährigen N-Ereignisses

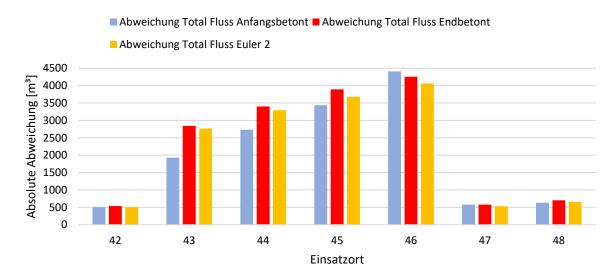


Abbildung 31: Absolute Abweichung der simulierten gesamten Durchflussmengen der Einsatzstellen in Benzhausen zwischen der Ausgangsmodellierung und den verschiedenen Intensitätsverteilungen des 100-jährigen N-Ereignisses

## 4.7 Sensitivitätsanalyse

Da das Modell besonders sensitiv auf die Eingangsparameter Niederschlag und Vorfeuchte reagiert, werden diese beiden Parameter in mehreren Modellläufen nacheinander um jeweils 10 % erhöht bzw. erniedrigt. Untersucht wird auch, wie sich eine gemeinsame Veränderung der beiden Parameter auf die Modellierungsergebnisse auswirkt.

#### Freiburg-Hochdorf

In Abbildung 33 sind die daraus resultierenden modellierten Abflussganglinien am Gebietsauslass des Einzugsgebietes abgebildet. Der Hochwasserscheitel wird von allen Abflussganglinien nach 50 Minuten nach Beginn des Niederschlagsereignisses erreicht. Die erreichten Abflüsse variieren dabei sehr stark,

vor allem die Erhöhung des Niederschlags führt zu einem Anstieg des Spitzenabflusses von rund 530 l/s. Die Reduzierung des Niederschlags verursacht dahingegen nur eine Verringerung des Spitzenabflusses von etwa 350 l/s. Dies entspricht einer Veränderung des Spitzenabflusses von rund 40 % bzw. 26 %. Die Änderung der Bodenvorfeuchte zeigt die geringste Auswirkung auf die Abflussganglinie, wobei eine Erhöhung von 10% zu einem Anstieg des Spitzenabflusses um rund 40 l/s führt und eine Reduzierung von 10 % den Spitzenabfluss um etwa 100 l/s ansteigen lässt. Die Abflussganglinien, bei denen der Niederschlag und die Bodenvorfeuchte jeweils um 10 % verändert wurden, ähneln den Abflussganglinien, bei denen nur der Niederschlagsinput verändert wurde, sehr stark. Im Gegensatz zu der Abflussganglinie der Modellierung mit den unveränderten Eingangsdaten, fallen die Abflussganglinien, bei denen die Eingangsparameter erhöht wurden, nach Erreichen des Spitzenabflusses auch etwas schneller ab. Die Abflussbeiwerte erhöhen bzw. verringern sich durch die Änderung des Niederschlaginputs auf 0.14 bzw. 0.1. Die Änderung der Bodenvorfeuchte führt in beiden Fällen zu einer Verringerung des Abflussbeiwertes um 0.01.

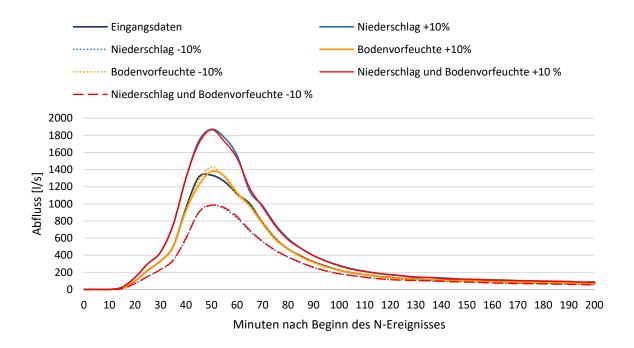


Abbildung 33: Simulierte Abflussganglinie am Gebietsauslass Freiburg-Hochdorf mit veränderten Eingangsparametern

In Abbildung 34 sind die Abweichungen, der maximalen Wasserstände, die an den einzelnen Schadstellen mit verändertem Niederschlagsinput simuliert wurden, von der Ausgangssimulation abgebildet. Es ist zu sehen, dass an allen Einsatzorten eine Erhöhung bzw. Reduzierung der Niederschlagseingangsdaten mit einer Erhöhung bzw. Verringerung der simulierten maximalen Wasserstände einhergeht. Einsatzort 4, der sich im Nordosten direkt am Hang befindet, ist von der Niederschlagsänderung besonders betroffen. Hier hat sich der maximale Wasserstand um knapp 37 % erhöht bzw. verringert. Darüber hinaus sind an den Einsatzorten entlang der Hauptstraße Benzhauserstraße (Einsatzort 11-13) und Hochdorferstraße (Einsatzort 20-31) Änderungen der maximalen Wasserstände von bis zu 4 cm zu

beobachten. Die Einsatzorte, die sich im Norden des Einzugsgebietes befinden, weisen kaum Veränderungen der absoluten maximalen Wasserstände auf. Bei Betrachtung der relativen Abweichung der maximalen Wasserstände ist zu erkennen, dass sich die maximalen Wasserstände auch an den Einsatzorten im Norden des Einzugsgebietes um bis zu 15 % gesteigert bzw. verringert haben.

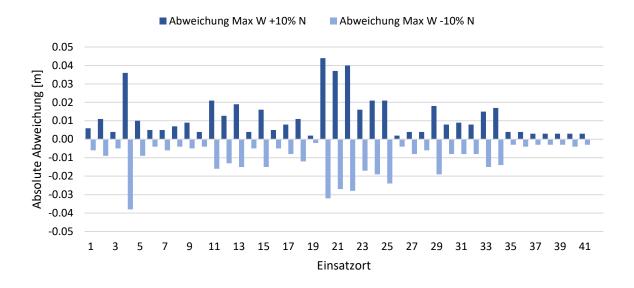


Abbildung 34: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Fließgeschwindigkeiten der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf zwischen der Ausgangsmodellierung und verändertem Niederschlagsinput

In Abbildung 35 sind die Abweichungen des gesamten Durchflusses, der an den einzelnen Schadstellen mit verändertem Niederschlagsinput simuliert wurde, von der Ausgangssimulation abgebildet. Auch hier lässt sich das räumliche Muster erkennen, dass vor allem die Einsatzorte in der Ortsmitte entlang der Hauptstraße Benzhauserstraße und Hochdorferstraße auf die Änderung der Niederschlagseingangsdaten reagieren. Die höchste absolute Abweichung ist an Einsatzort 21 zu erkennen, der sich in Ortsmitte an der Kreuzung befindet, an der die Hauptstraße Benzhauserstraße und Hochdorferstraße aufeinandertreffen. Die Veränderung des Niederschlaginputs führt zu einer Erhöhung bzw. Verringerung des gesamten Durchflusses von knapp 280 m³ bzw. 220 m³. Bei Betrachtung der relativen Abweichungen fällt besonders Einsatzort 4 (befindet sich im Nordosten direkt am Hang) auf, an dem sich der gesamte Durchfluss durch die Erhöhung des Niederschlages um etwa 60 % erhöht.

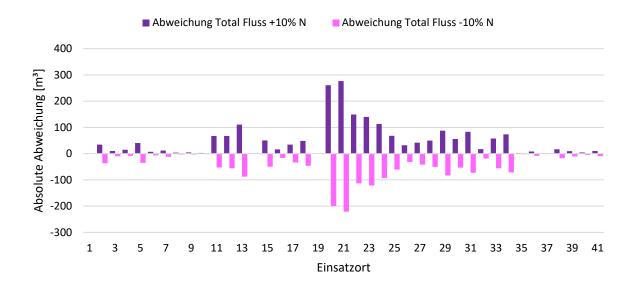


Abbildung 35: Absolute Abweichung der simulierten gesamten Durchflussmengen der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf zwischen der Ausgangsmodellierung und verändertem Niederschlagsinput

Für die Starkregenmodellierungen mit geänderten Bodenvorfeuchten wurden die gleichen Auswertungen wie für die Niederschlagsänderung durchgeführt (Abbildung A. 1 und 2). Die Veränderungen der maximalen Wasserstände durch eine Änderung der Bodenvorfeuchte sind sehr niedrig und bewegen sich nur im Millimeterbereich. An Einsatzort 4 (befindet sich im Nordosten direkt am Hang) führt beispielsweise eine Erhöhung der Bodenvorfeuchte zu einer Verringerung des maximalen Wasserstandes von knapp 3 mm, während eine Verringerung der Bodenvorfeuchte eine Erhöhung des maximalen Wasserstandes von rund 1.5 mm bewirkt. An einigen Einsatzorten führt die Änderung der Bodenvorfeuchte in beiden Fällen zu einer geringen Abnahme des maximalen Wasserstandes oder einer geringen Zunahme des maximalen Wasserstandes. Der gesamte Durchfluss ändert sich durch eine Erhöhung bzw. Verringerung der Bodenvorfeuchte auch wenig. Bei den Einsatzorten entlang der Hauptstraße Benzhauserstraße (Einsatzort 11-13) und Hochdorferstraße (Einsatzort 20-31) sind Abweichungen von bis zu 3 m³ bzw. 10 m³ festzustellen. Die Einsatzorte im Norden und Süden des Einzugsgebietes weisen nahezu keine Änderung des gesamten Durchflusses auf. An allen Einsatzorten führt eine Erhöhung der Bodenvorfeuchte zu geringeren Durchflussmengen und eine Verringerung der Bodenfeuchte zu höheren Durchflussmengen.

Die Analyse der Ergebnisse der Starkregenmodellierung, in der die Niederschlagseingangsdaten und die Bodenvorfeuchte gleichzeitig erhöht bzw. reduziert wurden, hat ergeben, dass sich die simulierten maximalen Wasserstände an allen Einsatzorten weniger als 1 mm von den simulierten maximalen Wasserständen der Modellierung mit erhöhtem bzw. reduziertem Niederschlagsinput unterscheiden. Auch der gesamte Durchfluss zeigt Abweichungen von weniger als 2 m³ zu den Ergebnissen der Modellierung mit verändertem Niederschlagsinput. Aufgrund dessen wird im weiteren Verlauf nicht näher auf diese Ergebnisse eingegangen.

## **Benzhausen**

In Abbildung 36 sind die modellierten Abflussganglinien am Gebietsauslass des Einzugsgebietes abgebildet. Der Hochwasserscheitel wird von allen Abflussganglinien unmittelbar nach 15 Minuten nach Beginn des Niederschlagsereignisses erreicht. Die erreichten Abflüsse variieren um bis zu 0.004 l/s von der Ausgangsmodellierung ab. Generell führt die Erhöhung des Niederschlaginputs zu der höchsten Veränderung des Hochwasserscheitels. Die Änderung der Bodenvorfeuchte zeigt die geringste Auswirkung auf die Abflussganglinie. Die Abflussganglinien, bei denen der Niederschlag und die Bodenvorfeuchte jeweils um 10 % verändert wurden, ähneln den Abflussganglinien sehr stark, bei denen nur der Niederschlagsinput verändert wurde. Die Abflussbeiwerte erhöhen bzw. verringern sich durch die Änderung des Niederschlaginputs nur um jeweils 0.01. Die Änderung der Bodenvorfeuchte zeigt keine Auswirkung auf den Abflussbeiwert.

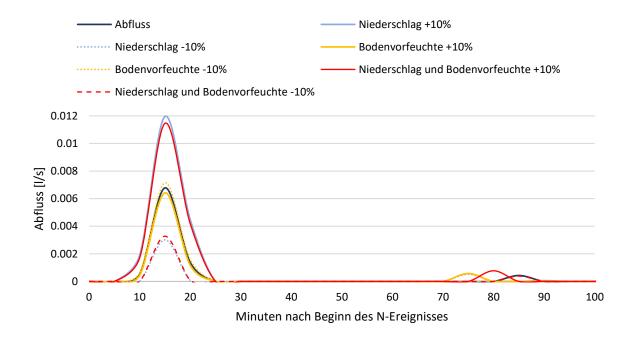


Abbildung 36: Simulierte Abflussganglinie am Gebietsauslass Benzhausen mit veränderten Eingangsparametern

In Abbildung 37 sind die absoluten Abweichungen der maximalen Wasserstände, die an den einzelnen Schadstellen mit verändertem Niederschlagsinput und zusätzlich mit veränderten Vorfeuchtebedingungen simuliert wurden, von der Ausgangssimulation abgebildet. Erkennbar ist, dass an allen Einsatzorten eine Erhöhung bzw. Reduzierung der Niederschlagseingangsdaten mit einer Erhöhung bzw. Verringerung der simulierten maximalen Wasserstände einhergeht. Die zusätzliche Änderung der Vorfeuchtebedingungen hat nur geringen Einfluss auf die simulierten maximalen Wasserstände. Eine Erhöhung bzw. Reduzierung der Bodenvorfeuchte führt lediglich zu einer Änderung der maximalen Wasserstände, die im Millimeterbereich liegt. Eine Erhöhung des Niederschlaginputs führt auf der Seestraße (Einsatzort

46) zu einer Erhöhung der maximalen Wasserstände um bis zu 4 cm, während eine Reduzierung der Niederschlagsmenge eine knapp 6 cm hohe Verringerung des maximalen Wasserstandes bewirkt.

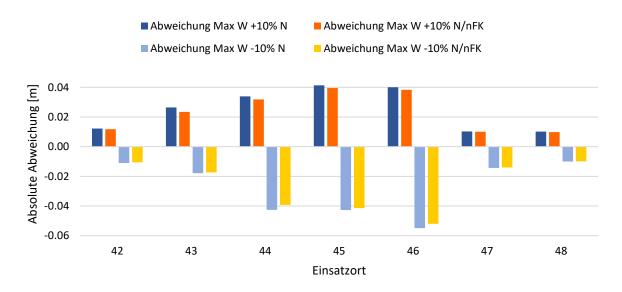


Abbildung 37: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Wasserstände der Einsatzstellen in Benzhausen zwischen der Ausgangsmodellierung und verändertem Niederschlagsinput sowie zusätzlichen Änderungen der Bodenvorfeuchte

Abbildung 38 zeigt die absolute Abweichung der simulierten gesamten Durchflussmenge aus den Modellierungen mit verändertem Niederschlagsinput und zusätzlich mit veränderten Vorfeuchtebedingungen von der Ausgangsmodellierung je Einsatzort. Die Abbildung zeigt das exakt gleiche Muster wie die Abbildung der Abweichung der maximalen Wasserstände. Die Erhöhung der Niederschlagsmenge führt an allen Einsatzorten zu einer Erhöhung der gesamten Durchflussmenge. Die Einsatzorte, die in der Ortsmitte liegen, zeigen die höchsten Veränderungen. Die Werte variieren hierbei zwischen rund 75 m³ und bis 270 m³, während die Einsatzorte im Süden und Nordwesten nur Änderungen von bis zu 50 m³ aufzeigen. Die Erhöhung der Bodenvorfeuchte führt an Einsatzort 46 zu einer Verringerung der gesamten Durchflussmenge von 15 m³, während eine Verringerung der Bodenvorfeuchte lediglich eine Veränderung von 1.5 m³ bewirkt. Allgemein wirkt sich die Veränderung der Bodenvorfeuchte nicht stark auf die gesamten Durchflussmengen auf, außer an Einsatzort 44 und 45, wo sich die gesamte Durchflussmenge jeweils um bis zu ca. 8 m³ verändert.

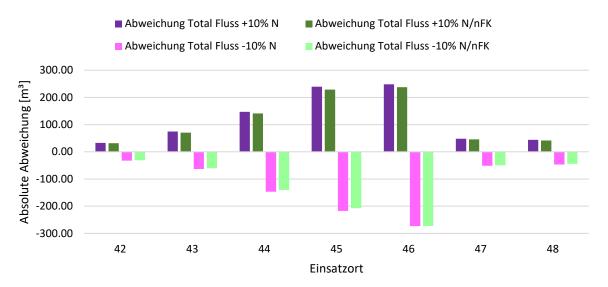


Abbildung 38: Absolute Abweichung der simulierten gesamten Durchflussmengen der Einsatzstellen in Benzhausen zwischen der Ausgangsmodellierung und verändertem Niederschlagsinput sowie zusätzlichen Änderungen der Bodenvorfeuchte

# 4.8 Modellevaluierung

## Einsatzort 8

Einsatzort 8 befindet sich im Nordosten des Einzugsgebietes im Fliederweg 1a. Das betroffene Gebäude befindet sich in unmittelbarer Nähe zur landwirtschaftlich genutzten Hangfläche. Laut Feuerwehrbericht wurde der Einsatz um 03:27 Uhr gemeldet, während in den Nachbarhäusern schon gegen 01:30 Uhr die Feuerwehr gerufen wurde. Im Feuerwehrbericht wird beschrieben, dass zum Zeitpunkt der Einkunft in einem Kellerraum von einer Größe von ca. 25 m² ein Wasserstand von schätzungsweise 0.05 m vorzufinden war, was einer gesamten Wassermenge von 1.25 m³ entspricht.

Anhand des zur Verfügung gestellten Fotomaterials kann die maximal vorhandene Wassermenge rekonstruiert werden. In Abbildung 39 ist der Zugang zur Garage und dem Kellerraum des Einsatzortes 8 abgebildet. Der maximale Wasserstand kann durch die hinterbliebene Schlammlinie an dem Garagentor auf etwa 1 m abgeschätzt werden. Die Breite der Fahrbahn wird auf 2.75 m, die Fahrbahnzufahrt auf eine Länge von 6.5 m und das Gefälle der Garagenzufahrt auf 15 % geschätzt. Die Schätzwerte ergeben sich aus §3 der Garagenverordnung Baden-Württemberg. Durch eine simple Volumenberechnung ergibt sich unter der Annahme, dass das Wasser links und rechts nicht von der Fahrbahn entweichen kann eine maximal angestaute Wassermenge von 9 m³.



Abbildung 39: Foto von Garageneinfahrt bei Einsatzort 8 (Quelle: Ortsverwaltung Freiburg-Hochdorf)

In dem Foto ist eine beträchtliche Menge an Schlamm erkennbar, was daraus schließen lässt, dass Wasser von dem landwirtschaftlich genutzten Hang Richtung Gebäude geflossen ist und dabei Feinmaterial transportiert hat. In Abbildung 40 ist erkennbar, dass das Modell diesen wichtigen Fließweg gut abbilden kann. Der Oberflächenabfluss fließt aus Richtung Nordwesten über den Acker Richtung Wohnsiedlung. An der betreffenden Stelle sind noch zwei weitere Schadstellen vorzufinden. Dies weist daraufhin, dass RoGeR\_dyn die Abflussbildungsprozesse räumlich verteilt korrekt darstellen kann. Zusätzlich ist zu sehen, dass von Richtung Norden ebenfalls Oberflächenabfluss von den Ackerflächen über die Straße Richtung der betroffenen Stellen fließt. Bei der Ortsbegehung konnte die Gefährdung der Einsatzstelle aufgrund der örtlichen Begebenheiten nachvollzogen werden. Beispielsweise sind die Grundstücke der Nachbarhäuser jeweils durch Hecken voneinander und von der Straße abgegrenzt, während das geschädigte Haus eine offene Zufahrt ohne Abgrenzung zur Straße hat. Zudem begünstigt die steile Garageneinfahrt, dass Wasser Richtung Gebäude fließt.

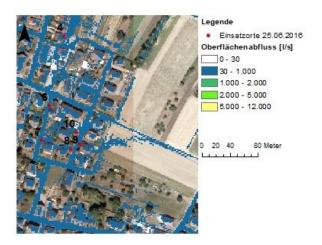


Abbildung 40: Simulierter Oberflächenabfluss an Einsatzort 8 und Umgebung

An Einsatzort 8 simuliert RoGeR\_dyn einen gesamten Durchfluss von rund 16 m³, eine maximale Fließgeschwindigkeit von 0.42 m/s und einen maximalen Wasserstand von 4.4 cm. An der anliegenden Straße kann mittels der Fließformel von Manning-Strickler eine maximale Fließgeschwindigkeit von 1 – 1.4 m/s berechnet werden und somit ein maximaler Abfluss von 0.3 – 0.5 m³/s. Für die Berechnung werden eine Straßenbreite von 5.5 m, eine Bordsteinhöhe von 6 cm, ein Gefälle von 2.5 % und ein Rauigkeitsbeiwert von 40 - 60 angenommen. An der anliegenden Straße modelliert RoGeR\_dyn einen Abfluss von rund 0.3 m³/s.

Die Ergebnisse zeigen, dass RoGeR\_dyn an der Einsatzstelle ausreichend Oberflächenabfluss modelliert, sodass es zu dem Schadensfall kommen konnte. Zudem stimmt der berechnete Abfluss auf der anliegenden Straße mit dem simulierten Oberflächenabfluss überein. Die Abflüsse können allerdings nicht direkt miteinander verglichen werden, da es sich um eine stark vereinfachte Berechnung handelt. Trotzdem liegen beide Werte in der gleichen Größenordnung und es kann somit davon ausgegangen werden, dass der simulierte Oberflächenabfluss plausibel ist.

#### Einsatzort 27

Einsatzort 27 befindet sich in der Ortsmitte des Einzugsgebietes in der Hochdorferstraße 10a. Das Haus befindet sich in unmittelbarer Nähe zur Brücke über den Brunnmatgraben. Der Schadensfall wurde nicht von der Feuerwehr dokumentiert, sondern durch ein Gespräch mit dem Anwohner identifiziert. Von der Überschwemmung waren insgesamt 3 Räume des Hauses betroffen, die jeweils auf eine Größe von 40 m², 20 m² und 15 m² geschätzt werden. Anhand des Fotomaterials und der Berichterstattung des Anwohners wurden Wasserstände von je 25 cm, 20 cm und 15 cm abgeschätzt (Abbildung 41). Somit wird das gesamte Wasservolumen in den Räumen auf etwa 16 m³ geschätzt. In Abbildung X sind die jeweiligen Räume abgebildet. Die Modellevaluierung an dieser Einsatzstelle erfolgt hier ausschließlich auf Grundlage der subjektiven Informationen des Anwohners und ist somit mit einer großen Unsicherheit verbunden.





Abbildung 41: Fotos der Schadensfälle an Einsatzort 27 (Quelle: Anwohner)

Abbildung 42 zeigt den von RoGeR\_dyn simulierten Oberflächenabfluss um die Einsatzstelle. Das Modell simuliert auch hier entlang aller abgebildeten Schadstellen Oberflächenabfluss, was als Hinweis für eine vom Modell räumlich korrekte Verteilung der Abflussbildungsprozesse dient. Aus der Beschreibung des Anwohners, aus verschiedenen Zeitungsartikeln und anderen Informationen geht hervor, dass der Oberflächenabfluss von Richtung Norden fließend und der Oberflächenabfluss von Richtung Süden fließend im Bereich der Brücke zusammenfließen. Nach dem Starkregenereignis wurde vor allem kritisiert, dass in dem Bereich unzureichend Abflussmöglichkeiten in den Brunnmatengraben vorhanden sind und der Oberflächenabfluss somit hauptsächlich entlang der Straße fließt. Zwischenzeitlich wurde auf das Problem reagiert, indem der Bordstein im Bereich der Brücke abgesenkt und mehrere Rinnen verlegt wurden, die direkt in den Brunnmatengraben führen. Die hohe Anzahl der Feuerwehreinsätze entlang der Hochdorferstraße sprechen dafür, dass das Gebiet besonders gefährdet ist. In der Ansicht des Oberflächenabflusses über das ganze Einzugsgebiet ist zu erkennen, dass die Hochdorferstraße einer der Hauptfließwege des simulierten Oberflächenabflusses darstellt.

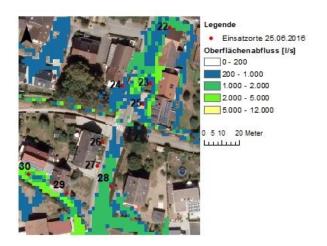


Abbildung 42: Simulierter Oberflächenabfluss an Einsatzort 27 und Umgebung

Die Starkregenmodellierung mit RoGeR\_dyn hat an dem Einsatzort einen gesamten Durchfluss von rund 325 m³, einen maximalen Wasserstand und eine maximale Fließgeschwindigkeit von 6 cm bzw. 0.8 m/s simuliert. An der anliegenden Straße kann mittels der Fließformel von Manning-Strickler eine maximale Fließgeschwindigkeit von 0.7 – 1 m/s berechnet werden und somit ein maximaler Abfluss auf der Straße von 0.5 – 0.7 m³/s. Für die Berechnung wird eine Straßenbreite von 6 m, eine Bordsteinhöhe von 12 cm, ein Gefälle von 0.5 % und ein Rauigkeitsbeiwert von 40 - 60 angenommen. RoGeR\_dyn simuliert an dieser Stelle einen Oberflächenabfluss von rund 1 m³/s.

Auch an dieser Einsatzstelle zeigen die Ergebnisse, dass RoGeR\_dyn ausreichend Oberflächenabfluss modelliert, sodass es zu dem Schadensfall kommen konnte. Zusätzlich liegt der berechnete Abfluss der anliegenden Straße in der gleichen Größenordnung wie der simulierte Oberflächenabfluss. Demnach kann das Modell auch hier den Oberflächenabfluss plausibel darstellen.

## Einsatzort 46

Bei Einsatzort 46 handelt es sich um keinen Schadensfall an einem Gebäude, sondern laut Feuerwehrbericht um eine überflutete Straße, die komplett mit Schlamm überdeckt war. Leider sind auch an dieser Stelle weder Mess- noch Schätzwerte des Abflusses oder der Wassertiefen vorhanden. Aufgrund dessen werden mit Hilfe der Fließformel von Gauckler-Manning-Strickler die Fließgeschwindigkeit und der maximale Abfluss der Straße abgeschätzt. Bei der Ortsbegehung wurde die Straßenbreite und die Bordsteinhöhe an dem Querschnitt des Einsatzortes 46 abgemessen. Die Straßenbreite liegt bei 6 m, während die Bordsteinhöhe ca. 15 cm bemisst. Das Längsgefälle der Straße wird aus den LIDAR Daten abgeleitet und beträgt 1.2 %. Unter Annahme eines Rauigkeitbeiwertes von 40 - 60 m<sup>1/3</sup>/s ergeben sich eine Fließgeschwindigkeit von 1.2 – 1.8 m/s und ein maximaler Abfluss von 1.1 – 1.6 m<sup>3</sup>/s.

In Abbildung 43 ist der von RoGeR\_dyn simulierte Oberflächenabfluss abgebildet. Erkennbar ist, dass das Modell auch hier den Fließweg des Oberflächenabflusses von den Ackerflächen in das Wohngebiet korrekt darstellt. Mit dem Oberflächenflächenabfluss wird von den Ackerflächen erodiertes Bodenmaterial in die Wohnsiedlung transportiert, wo es sich im Norden der Seestraße ansammelt. Die Schlammmassen wurden am Morgen des 25.06.2016 mit einem Frontlader abgetragen. Entlang des Fließweges liegen noch 4 weitere Schadstellen, was darauf hinweist, dass das Modell die räumliche Verteilung der Abflussbildungsprozesse korrekt darstellen kann.

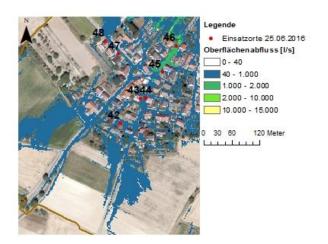


Abbildung 43: Simulierter Oberflächenabfluss an Einsatzort 46

In Benzhausen stellt eines der Hauptprobleme die unzureichend bemessene Aufnahmekapazität der Kanalisation dar. Im Jahr 2016 gibt es in dem Stadtgebiet noch ein Mischsystem, bei dem Regen- und Abwasser gemeinsam in einem Kanalrohr abgeleitet werden. Die Pläne für eine Erneuerung der Kanalisation lagen zum Zeitpunkt des Starkregenereignisses schon vor. Im Jahr 2017 wurde ein modernes Trennsystem gebaut, in dem die Kanalrohre zudem vergrößert wurden, um die Aufnahmekapazität zu steigern. Bei den Überschwemmungen des Starkregenereignisses im Jahr 2016 kam es aufgrund der unzureichenden Dimensionierung der Kanalisation und den enormen Schlammmassen zu einer Überlastung der Kanalisation, sodass auf den Straßen kaum Wasser aufgenommen wurde und weiter oberflächlich abfloss. Die Starkregenmodellierung mit RoGeR\_dyn modelliert an der Seestraße einen

gesamten Durchfluss von rund 1027 m³, einen maximalen Wasserstand und eine maximale Fließgeschwindigkeit von 28 cm bzw. 1.9 m/s. Der simulierte Oberflächenabfluss an dieser Stelle beträgt rund 1.7 m³/s.

Auch an Einsatzort 46 stimmt der von RoGeR\_dyn simulierte und der berechnete Oberflächenabfluss überein. Die Modellierung scheint auch an dieser Stelle das Abflussgeschehen plausibel abzubilden.

#### Einsatzort 20/21

Aus einem Bericht der Badischen Zeitung geht hervor, dass sich bei dem Starkregenereignis besonders viel Wasser im Bereich des Gasthauses "Zur Sonne" angesammelt hat. Wie in Abbildung 44 zu sehen, simuliert das Modell auch diese Aussage rein optisch zufriedenstellend ab. Erkennbar ist, dass entlang der Straße ein gesamter Durchfluss von 600 - 2000 m³ simuliert wurde.

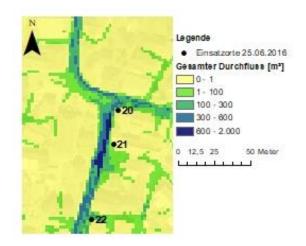


Abbildung 44: Simulierter gesamter Durchfluss an Einsatzort 20 und 21

## Übersicht aller Einsatzorte

In Tabelle 7 sind alle Einsatzorte aufgelistet, an denen die Feuerwehr Informationen über den Wasserschaden dokumentiert hat. Es ist jeweils das Wasservolumen, welches an den Schadstellen festgestellt wurde, sowie die Ergebnisse der Starkregenmodellierung mit RoGeR\_dyn dargestellt.

Die simulierte gesamte Durchflussmenge ist an allen Einsatzorten höher als das an den Schadstellen vorgefunden Wasservolumen mit einer Ausnahme von einem Einsatzort im Westen des Stadtgebietes Freiburg-Hochdorf (Einsatzort 19). Das Modell simuliert einen gesamten Durchfluss von rund 3 m³, der direkt am Gebäude vorbeifließt. Im Keller des Gebäudes stand nach Auskunft der Feuerwehr allerdings rund 9 m³ Wasser. Das Modell bildet den Fließweg korrekt ab, nur mit einer geringeren Durchflussmenge als erwartet. Im angrenzenden Garten des Nachbarhauses wird ein gesamter Durchfluss von bis zu 85 m³ simuliert. Der Abfluss fließt laut Modell auf direktem Weg in den laut DGM tiefer liegenden Nachbarsgarten. Unter Anderem könnten kleinräumige Oberflächenstrukturen, die nicht im 2 x 2 m² DGM abgebildet werden können, beispielsweise dafür verantwortlich sein.

Unter Einbeziehung aller Einsatzorte beträgt der höchste simulierte maximale Wasserstand in Freiburg-Hochdorf 21 cm, während er in Benzhausen bei 28 cm liegt. Laut einem Zeitungsbericht der Badischen Zeitung waren die Straßen in beiden Stadtgebieten teilweise bis zu 30 cm überschwemmt. Die Größenordnung der modellierten maximalen Wasserstände scheint daher plausibel abgebildet zu werden.

Tabelle 7: Informationen zu den Schäden an den Einsatzorten und Ergebnisse der Starkregenmodellierung

-		Wasservolumen	Gesamter	Maximaler	Maximale Fließge-
Einsatzort	Adresse	in Keller laut	Durchfluss [m³]	Wasserstand	schwindigkeit [m/s]
		Feuerwehr [m <sup>3</sup> ]		[m]	
2	Zwischenweg 3	7	184	0.065	0.8
7	Fliederweg 1	2.3 – 3.6	53	0.039	0.6
8	Fliederweg 1a	1.3	16	0.044	0.4
9	Fliederweg 16	6	17	0.032	0.5
10	Fliederweg 5	1	10	0.028	0.4
14	Kirchenpfad 13a	0.5 - 0.6	3	0.030	0.5
16	Zur March 7	2	72	0.045	0.6
17	Fuchswinkel 17	10	144	0.074	0.8
18	Fuchswinkel 16a	2.5	154	0.066	0.5
19	Fuchswinkel 15b	8 – 9	3	0.020	0.3
32	Mooswaldstr. 8a	1	109	0.095	1
34	Seilerweg 31	10	366	0.149	1.3
35	Am Retzgraben 68	2.5 – 5	13	0.045	0.4
39	Am Retzgraben 17	3.5 – 7	64	0.037	0.6
41	Waldstraße 2	14	65	0.039	0.6
42	St. Agatha Weg 4	40	102	0.075	1.1
48	Holzhauserstr. 15	80	212	0.073	0.8

## Starkregenmodellierung der verschiedenen Szenarien

Tabelle 8 zeigt die durchschnittlichen Höhen der simulierten maximalen Wasserstände und gesamten Durchflussmengen an den Einsatzorten der beiden Einzugsgebiete. Die Ergebnisse zeigen, dass die Einzugsgebiete auf die Änderung der Bodenvorfeuchte und Niederschlagseigenschaften unterschiedlich

stark reagieren. Der durchschnittliche maximale Wasserstand hat sich in Freiburg-Hochdorf durch die Änderung der Eingangsparameter nur geringfügig verändert, während die Auswirkungen auf die Ergebnisgrößen in Benzhausen deutlich höher sind. Beide Einzugsgebiete sind durch eine Erhöhung des Niederschlagsinputs am höchsten beeinflusst. Neben der Erhöhung der Niederschlagsintensität beeinflussen die Niederschlagsmenge und die Intensitätsverteilung das Abflussgeschehen maßgeblich. Die Modellierung mit verschiedenen Intensitätsverteilungen des 100-jährigen Bemessungsniederschlags zeigt in beiden Einzugsgebieten eine enorme Erhöhung der mittleren maximalen Wasserstände und mittleren gesamten Durchflussmengen. In Hochdorf steigen die maximalen Wasserstände durchschnittlich auf bis zu 37 cm und in Benzhausen sogar bis zu 45 cm. Die anfangsbetonte Intensitätsverteilung zeigt in beiden Einzugsgebieten geringere Auswirkungen als die mitten- und endbetonte Verteilung.

Tabelle 8: Durchschnittliche maximale Wasserstände und gesamte Durchflussmengen in den Einzugsgebieten je nach Starkregenmodellierung

		Ausgangs-	+10 % N	-10% N	+10% nFK	-10% nFK	Anfangs- betont	Endbe- tont	Euler 2
Hochdorf	mittlerer maximaler	9	10	8	9	9	24	37	36
Benzhausen	Wasser- stand [cm]	14	17	12	14	14	32	45	45
Hochdorf	mittlerer	225	276	181	224	227	1852	2472	2295
Benzhausen	gesamter Durchfluss [m³]	411	530	292	406	414	2443	2727	2624

#### Freiburg-Hochdorf

In Tabelle 9 ist die Anzahl der Schadensmeldungen dargestellt, die einen bestimmten maximalen Wasserstand und eine bestimmte gesamte Durchflussmenge aufweisen im Vergleich mit den Ergebnissen der verschiedenen Modellierung des 100-jährigen Niederschlagsereignisses und den geänderten Eingangsparametern. Insgesamt wurden in Freiburg-Hochdorf 41 Feuerwehreinsätze am 25.06.2016 protokolliert. Anhand der Zahlen ist zu erkennen, dass die Erhöhung des Niederschlaginputs generell zu höheren maximalen Wasserständen führt, während eine Reduzierung zu geringeren Änderungen der maximalen Wasserständen leitet. Der Effekt ist besonders bei der Gruppe mit maximalen Wasserständen von weniger als 5 cm und über 20 cm zu erkennen. 10 % mehr Niederschlag führt an 3 Einsatzorten dazu, dass sich die maximalen Wasserstände über 5 cm erhöhen und an 2 Einsatzorten steigen die modellierten maximalen Wasserstände auf über 20 cm an. 10 % weniger Niederschlag führt dahingegen dazu, dass sich nur an einem weiteren Einsatzort der maximale Wasserstand auf unter 5 cm verringert

und an fünf Einsatzorten weniger der maximale Wasserstand über 20 cm ansteigt. Das gleiche Muster ist bei den gesamten Durchflussmengen erkennbar. An drei Einsatzorten steigen die gesamten Durchflussmengen über 200 m³ an bei einer Erhöhung des Niederschlags und an zwei Einsatzorten weniger verringert sich die gesamte Durchflussmenge auf unter 200 m³. Die Veränderung der Bodenvorfeuchte führt dazu, dass in beiden Fällen ein Einsatzort weniger einen maximalen Wasserstand von über 20 cm aufweist. Auf die gesamte Durchflussmenge ist kein Effekt erkennbar. Die Kombination von erhöhtem Niederschlag und Bodenvorfeuchte führt im Vergleich zu nur erhöhtem Niederschlag dazu, dass an einem weiteren Einsatzort der maximale Wasserstand auf weniger als 5 cm sinkt. An der gesamten Durchflussmenge sowie an den Ergebnissen der Kombination von verringertem Niederschlag und Bodenvorfeuchte ist kein Effekt der gemeinsamen Änderung der Eingangsdaten zu erkennen.

Von den verschiedenen Intensitätsverteilungen des Bemessungsniederschlags führt die endbetonte Variante zu den höchsten Änderungen. Dabei werden an zusätzlich 21 Einsatzorten höhere maximale Wasserstände von über 20 cm simuliert. Die gesamte Durchflussmenge steigt an zusätzlich 16 Einsatzorten über 200 m³. Die geringsten Änderungen verursacht die anfangsbetonte Intensitätsverteilung. Hier werden an zusätzlich 15 weiteren Einsatzorten höhere maximale Wasserstände von über 20 cm simuliert und an 14 Einsatzorten höhere Durchflussmengen von 200 m³ modelliert. Im Schnitt liegt der simulierte gesamte Durchfluss an den Einsatzorten bei der Modellierung des 100-jährigen Niederschlagereignisses für alle Intensitätsverteilungen bei 2206 m³.

Allgemein reagiert das Einzugsgebiet in geringem Maße mehr auf eine Erhöhung des Niederschlagsinputs als auf eine Verringerung. Die Durchflussmengen werden an 7 % der Einsatzorte so beeinflusst, dass sie den Schwellenwert von 200 m³ überschreiten, während bei einer Verringerung nur 5 % der Einsatzorte betroffen sind. Die Modellierung des 100-jährigen Niederschlagsereignisses führt je nach Intensitätsverteilung an 34 - 39 % der Einsatzorte zu einer Überschreitung des Schwellenwertes von  $200 \, \text{m}^3$ . An 37 - 51 % der Einsatzorte werden im Vergleich zur Ausgangsmodellierung höhere maximale Wasserstände von  $20 \, \text{cm}$  simuliert.

Tabelle 9: Änderung der Anzahl der Einsatzorte in Freiburg-Hochdorf, die bestimmte maximale Wasserstände und gesamte Durchflussmengen erreichen, im Vergleich mit den verschiedenen Starkregenmodellierungen

	Ausgangs- situation	+10% N	-10% N	+10% nFK	-10% nFK	Anfangs- betont	Endbe- tont	Euler 2
Max W								
< 0.05	17	14	18	17	17	1	1	1
0.05 - 0.2	21	22	23	22	22	22	16	18
> 0.2	3	5	0	2	2	18	24	22
<b>Total Fluss</b>								
< 200	23	20	25	23	23	9	7	8
> 200	18	21	16	18	18	32	34	33

### Benzhausen

In Tabelle 10 ist die Anzahl der Schadensmeldungen dargestellt, die einen bestimmten maximalen Wasserstand und eine bestimmte gesamte Durchflussmenge aufweisen im Vergleich mit den Ergebnissen der verschiedenen Modellierung des 100-jährigen Niederschlagsereignisses und den geänderten Eingangsparametern. Insgesamt wurden in Benzhausen sieben Feuerwehreinsätze am 25.06.2016 protokolliert.

Der Schwellenwert der maximalen Wasserstände wurde im Vergleich zu den Analysen in Freiburg-Hochdorf von 5 cm auf 10 cm angehoben, da die modellierten maximalen Wasserstände in Benzhausen generell höher sind und an keinem Einsatzort geringer als 5 cm sind. Die maximalen Wasserstände der Ausgangsmodellierung liegen im Schnitt bei 14 cm, während sie in Freiburg-Hochdorf durchschnittlich bei 9 cm liegen. Bei den gesamten Durchflussmengen geht der Unterschied zwischen den beiden Einzugsgebieten auch deutlich auseinander, denn die durchschnittliche Durchflussmenge an den Einsatzorten in Freiburg-Hochdorf liegt bei 225 m³ und in Benzhausen bei 411 m³. Der Schwellenwert wurde deshalb in Benzhausen ebenfalls etwas angehoben.

Anhand der Zahlen ist zu erkennen, dass die Erhöhung des Niederschlaginputs zu höheren maximalen Wasserständen an den Einsatzorten führt, während durch die Reduzierung kein Effekt erkennbar ist. 29 % der Einsatzorte weisen durch eine Niederschlagserhöhung höhere maximale Wasserstände über 20 cm auf. Ein gegensätzliches Muster ist bei den gesamten Durchflussmengen erkennbar. Nur eine Verringerung der Niederschlagsmenge führt dazu, dass an 43 % der Einsatzorte die gesamten Durchflussmengen auf unter 250 m³ sinken. Die Veränderung der Bodenvorfeuchte führt in keinem der beiden Fälle dazu, dass an mehr oder weniger Einsatzorten die Schwellenwerte über- oder unterschritten werden. Die Kombination von erhöhtem Niederschlag und Bodenvorfeuchte führt im Vergleich zu den Ergebnissen, bei denen nur der Niederschlagsinput verändert wurde, ebenfalls zu keinem Einfluss.

Von den verschiedenen Intensitätsverteilungen des Bemessungsniederschlags führt die endbetonte und mittenbetonte Variante zu höheren Veränderungen bei den maximalen Wasserständen als die anfangsbetonte Intensitätsverteilung. Die end- und mittenbetonte Variante führt an 72 % der Einsatzorte zu einer Erhöhung der maximalen Wasserstände auf über 20 cm, während die anfangsbetonte Variante nur zu einer Erhöhung an 43 % der Einsatzorte führt. Die simulierten Durchflussmengen liegen bei allen Varianten an den Einsatzorten über 250 m³. Im Schnitt liegt die simulierte gesamte Durchflussmenge an den Einsatzorten bei der Modellierung des 100-jährigen Niederschlagereignisses für alle Intensitätsverteilungen bei 2598 m³.

Allgemein reagiert das Einzugsgebiet auf eine Erhöhung des Niederschlagsinputs mehr als auf eine Verringerung oder Veränderung der Bodenvorfeuchte, wenn man die simulierten maximalen Wasserstände betrachtet. Die gesamte Durchflussmenge erhöht sich an 43 % der Einsatzorte auf eine Menge von über 250 m³ sowohl bei einer Erhöhung der Niederschlagsmenge als auch bei der Änderung der Bodenvorfeuchte. Die Modellierung des 100-jährigen Niederschlagsereignisses führt bei allen betrachteten Intensitätsverteilungen an 57 % der Einsatzorte zu einer Überschreitung des Schwellenwertes von 250 m³. An 43 – 71 % der Einsatzorte werden im Vergleich zur Ausgangsmodellierung höhere maximale Wasserstände von 20 cm simuliert.

Tabelle 10: Änderung der Anzahl der Einsatzorte in Benzhausen, die bestimmte maximale Wasserstände und gesamte Durchflussmengen erreichen, im Vergleich mit den verschiedenen Starkregenmodellierungen

	Ausgangs-	+10% N	-10% N	+10% nFK	-10% nFK	Anfangs- betont	Endbe- tont	Euler 2
Max W								
< 0.1	3	2	3	3	3	0	0	0
0.1 - 0.2	3	2	3	3	3	3	1	1
> 0.2	1	3	1	1	1	4	6	6
<b>Total Fluss</b>								
< 250	4	1	1	1	1	0	0	0
> 250	3	6	6	6	6	7	7	7

## 5. Diskussion

Die Ergebnisse der Modellevaluierung zeigen, dass RoGeR\_dyn den räumlichen Verlauf des Oberflächenabflusses in beiden Einzugsgebieten korrekt simulieren kann. An allen untersuchten Schadstellen bildet das Modell das nachweislich oberflächlich abgeflossene Wasser ab. Aus dem Amtsblatt Nr. 21 (2019) geht hervor, dass die Hauptfließwege des Oberflächenabflusses in der Benzhauser-, Mooswald-und Hochdorferstraße sowie dem St. Agatha Weg liegen. Neben den bekannten Schadstellen hat das Modell auch diese Fließwege korrekt wiedergegeben. Die Starkregenmodellierungen zeigen, dass an vielen weiteren Stellen in den Einzugsgebieten Oberflächenabfluss mit hoher gesamter Durchflussmenge simuliert wurden, an denen keine Schadensmeldungen vorhanden sind. Es ist anzunehmen, dass noch weitere Gebäude und Grundstücke bei dem Starkregenereignis beschädigt wurden. Die Badische Zeitung berichtet von Schäden von mehr als einer Million Euro (BZ, 2019). Durch die Recherche und die Interviews konnten in Freiburg-Hochdorf zehn weitere Schadstellen identifiziert werden. Eine Vergrößerung der Zahl der befragten Anwohner hätte vermutlich die Anzahl der Schadensstellen noch weiter erhöht.

Die beiden nebeneinander liegenden Stadtgebiete Freiburg-Hochdorf und Benzhausen werden durch einen Hügel voneinander abgegrenzt. Am Abend des 24.06.2016 haben sich zwischen den beiden Ortschaften mehrere konvektive Zellen verbunden, die zu dem Starkregenereignis führten. An den Einzugsgebietsgrenzen zeigen die Niederschlagsradardaten die höchsten Niederschlagsintensitäten. Der gebildete Oberflächenabfluss ist von den landwirtschaftlich genutzten Hangflächen in beide Ortschaften geflossen und hat sich dabei in den Wohngebieten vor allem auf den Straßen konzentriert. Da sich der Oberflächenabfluss auf den Ackerflächen gebildet hat, wurde durch Wassererosion Feinmaterial von den Ackerflächen abgetragen. Belegbar ist dies durch die beobachteten Mengen an Schlamm in beiden Einzugsgebieten (Abbildung 39, 41; BZ, 2016, 2019). Für die Modellevaluierung hat die Abflusskonzentration auf den Straßen den Vorteil, dass der maximale Abfluss an den recht gut bestimmbaren Straßenquerschnitten mittels der Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler abgeschätzt werden kann. Der Vergleich der berechneten und simulierten Oberflächenabflüsse an den drei untersuchten Einsatzorten zeigt eine plausible Übereinstimmung. Da es sich jedoch um keine Messwerte handelt, sondern lediglich um eine Berechnung mit starker Vereinfachung, dürfen die Werte nicht direkt miteinander verglichen werden. Eine abschließende Bewertung ist somit nur bedingt möglich. Eine weitere Analyse zeigt, dass mit Ausnahme von einer Schadstelle das Modell an allen Einsatzorten gesamte Durchflussmengen simuliert, die mengenmäßig für die protokollierten Schäden hätten verantwortlich sein können. Beide Evaluierungen unterstützen die Annahme, dass das Modell das Abflussgeschehen plausibel abbilden kann.

Die Berücksichtigung der Kanalisation in den Modellierungen führt generell zu einer Verringerung der simulierten maximalen Wasserstände, maximalen Fließgeschwindigkeiten und gesamten Durchflussmengen. An wenigen Stellen in den Einzugsgebieten erhöhen sie sich allerdings. Erklärbar ist dieses Phänomen dadurch, dass sich der Oberflächenabfluss durch die punktuelle Aufnahme von Niederschlagswasser eher auf einzelne Rasterzellen konzentriert. An Stellen, an denen sich die

Abflusskonzentration nicht hauptsächlich auf der Straße befindet, wirkt sich dieser Effekt besonders stark aus. Darüber hinaus wird im Norden von Hochdorf aufgenommenes Niederschlagswasser teilweise an einer anderen Stelle im Einzugsgebiet in den Brunnmatengraben abgeleitet, weswegen dort mehr Wasser für die Abflussbildung vorhanden ist. Eine Unsicherheit bei der Starkregenmodellierung mit Berücksichtigung der Kanalisation ist, dass die Kanalschächte und Straßeneinläufe in der Modellierung in ihrer Größe nicht korrekt abgebildet werden können, da die räumliche Auflösung bei 2 x 2 m² liegt. Bei den Ergebnissen ist besonders Einsatzort 46 auffällig, da sich dort der gesamte Durchfluss um rund 4700 m³ durch die Berücksichtigung der Kanalisation erhöht hat. Neben den bereits erwähnten Effekten ist in Benzhausen die Dimensionierung der Kanalisation ein großes Problem. Durch die geringe Aufnahmefähigkeit der Kanalisation wurden in der Modellierung entlang der Straßen nur sehr wenige Straßeneinläufe und Kanalschächte berücksichtigt. Die Berechnung der Aufnahmekapazitäten der Straßeneinläufe mittels der Formel von Kemper (2018) konnte auf den Großteil der Straßeneinläufe nicht angewendet werden. Grund hierfür ist, dass die Anwendungsgrenzen der Formel nicht eingehalten werden konnten. Ungünstige Straßengeometrien und der hohe simulierte Oberflächenabfluss führen dazu, dass die Straßeneinläufe aufgrund zu hoher Fließgeschwindigkeiten und Durchflussmengen überströmt wurden. Für die Berechnung stehen nur die simulierten mittleren maximalen Wasserstände zur Verfügung, was dazu führt, dass stellenweise die Anwendungsgrenzen der Berechnungsformel nicht eingehalten werden können. Dass aufgrund dessen die Mehrzahl der Straßeneinläufe und Kanalschächte nicht in der Modellierung berücksichtigt wurden, bildet die Realität nur bedingt ab. Es ist nicht davon auszugehen, dass von den Straßeneinläufen während des gesamten Ereignisses überhaupt kein Wasser aufgenommen werden konnte. Diesen Straßeneinläufen hätten standardmäßig niedrige Aufnahmekapazitäten zugewiesen werden können, um den Effekt der Kanalisation entlang der Hauptfließwege zu verstärken. In Realität kam es bei dem Starkregenereignis in beiden Einzugsgebieten zu einer Überlastung des Kanalisationssystems. Die hohen Mengen an Schlamm haben die Straßeneinläufe verstopft, sodass kein Wasser mehr aufgenommen werden konnte und teilweise sogar Wiederaustritte zu beobachten waren. Aus einem Gespräch mit dem Abteilungsleiter des Garten- und Tiefbauamtes Freiburg und Zeitungsberichten der Badischen Zeitung (BZ, 2019, 2020) geht hervor, dass zwischenzeitlich auf dieses Problem reagiert wurde und die Kanalisation in Benzhausen im Jahr 2017 komplett erneuert wurde. Das Mischsystem wurde auf ein Trennsystem umgestellt und die Kanalrohre vergrößert. Auch in Teilen von Freiburg-Hochdorf wurden in den Jahren 2019 und 2020 größere Kanalrohre verlegt. Beispielsweise wurden die Kanalrohre in der Hochdorferstraße von 30 cm auf 80 cm Durchmesser vergrößert (BZ, 2018). Zudem wird in Hochdorf die Straßenneigung untersucht, da wegen eines ungünstigen bzw. mangelnden Gefälles Wasser eher in Grundstücke und Keller läuft als in den Brunnmatengraben. Die Kosten für diese Maßnahmen lagen laut Angaben der Badischen Zeitung bei rund 2.6 Millionen Euro (BZ, 2018).

Die simulierten Abflusswerte einzelner Schadstellen, die sich in verzweigten Nebenstraßen und nicht entlang der Hauptfließwege befinden, erscheinen etwas zu niedrig. Diese befinden sich in Freiburg-Hochdorf im Norden und Süden des Einzugsgebietes und in Benzhausen im Nordwesten und Süden. Zurückzuführen ist dieser Effekt unter anderem auf die räumliche Variabilität der Gesamtinfiltration, die vor allem vom Versiegelungsgrad, der Landnutzung und der Bodenart beeinflusst wird. Auf

Ackerflächen führen geringe Makroporenlängen und -dichten zu einer geringen Makroporeninfiltration, während auf Grünflächen hohe Makroporenlängen und -dichten zu einer hohen Makroporeninfiltration beitragen. Ausgewiesene Waldflächen sind zudem stark durch einen hohen Interzeptionsspeicher charakterisiert. In Freiburg-Hochdorf findet die höchste Gesamtinfiltration auf den Ackerflächen statt und kleinräumig in Wohngebieten auf Garten- und Grünflächen, sowie an Flächen mit Bäumen. In Benzhausen ist die Gesamtinfiltration auf den Grünflächen und ebenfalls kleinräumig in der Wohnsiedlung an Flächen mit Bäumen am höchsten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den Starkregenmodellierungen in Benzhausen die Verschlämmung der Ackerflächen berücksichtigt wurde. Im Modell wird dabei auf den Ackerflächen die Makroporendichte der vertikal ausgerichteten Makroporen reduziert. Die Lössböden der Ackerflächen mit ihrem hohen Anteil an Schluff neigen zur Verschlämmung, weshalb es sinnvoll gewesen wäre diesen Effekt auch in Hochdorf zu berücksichtigen. Das hochaufgelöste 2 x 2 m² DGM und die daraus abgeleiteten Parameter ermöglichen eine plausible Modellierung der Fließpfade. Im Detail können diese Daten allerdings zu kleinräumigen Ungenauigkeiten führen. Durch die Berücksichtigung aller künstlicher und natürlicher Oberflächenstrukturen kann das Abflussgeschehen beeinflusst werden. Beispielsweise führt die Berücksichtigung der Vegetation im Siedlungsgebiet dazu, dass Fließwege nicht durchgängig simuliert werden und zu hohe Infiltrationsraten angenommen werden. Dieser Effekt ist besonders bei dem simulierten Oberflächenabflüssen entlang des Brunnmatengraben in Hochdorf erkennbar.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle der teilweise sehr niedrig simulierten Oberflächenabflüsse ist, dass auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen die Infiltration möglicherweise zu hoch eingeschätzt wurde. Daraufhin ist im Modell weniger Wasser in Richtung Wohngebiet abgeflossen. In beiden Einzugsgebieten ist die Matrixinfiltration die dominante Infiltrationskomponente. Durch die hohe mittlere Bodenvorfeuchte von rund 78 % spielt die Infiltration durch Trockenrisse in beiden Gebieten keine nennenswerte Rolle. Eine weitere mögliche Fehlerquelle liegt beim Niederschlagsinput. Die Niederschlagsintensitäten tragen wesentlich zur Ermittlung der Infiltration bei, weshalb es zu Unsicherheiten kommen kann. Darüber hinaus sind Niederschläge durch kleinräumige Variabilität gekennzeichnet. Die Dichte der meteorologischen Bodenmessnetze ist nicht ausreichend, um kleinräumige konvektive Starkniederschläge zu erfassen. Für eine bessere räumliche Erfassung der Niederschläge werden Radardaten verwendet. Die Radaranalyse unterschätzt jedoch systematisch die Niederschlagsmengen gegenüber den Messstationen. Dafür sind unter anderem Dämpfungseffekte bei der Radarmessung, fehlerbehaftete Korrekturverfahren und Falschechos durch beispielsweise Windkraftanlagen verantwortlich (Becker et al., 2016). Für die Starkregenmodellierung wurden fünf-Minuten Radardaten verwendet. Diese werden aus stündlichen Regenradardaten abgeleitet, die an Messwerten der Bodenmessstationen angeeicht werden. Um dem Dämpfungseffekt entgegenzuwirken werden die Niederschläge durch einen Korrekturfaktor angeglichen.

In der Starkregenmodellierung beider Einzugsgebiete ist der dominierende Oberflächenabflussprozess der HOA. Es wurde kein nennenswerter Abfluss durch präferentielles Fließen simuliert. Dennoch ist die Betrachtung dieser Abflusskomponente relevant, vor allem aus Sicht des Boden- und Gewässerschutzes.

Bei Sturzfluten ist das abfließende Wasser häufig kontaminiert, beispielsweise durch ausgewaschene Pestizide, auslaufendes Benzin, Heizöl, Abwasser oder andere Giftstoffe. Verunreinigtes Wasser kann oberflächlich abfließen oder durch präferentielles Fließen schnell in die Tiefe gelangen. Laut Baram et al. (2012) können die vom fließenden Wasser transportierten Schadstoffe die biochemisch aktive Schicht der vadosen Zone umgehen, sodass keine Schadstofffixierung oder -abbau stattfinden kann. Dadurch kann es zu einer Verunreinigung des Grundwassers kommen.

Die beiden Einzugsgebiete waren in den letzten sechs Jahren insgesamt drei Mal von Überflutungen durch Starkregenereignisse betroffen, wovon das Ereignis im Juni 2016 die höchsten Schäden verursacht hat. Seither arbeiten alle beteiligen Ämter an einem umfassenden Konzept zur Verbesserung der Situation. Wie zuvor erwähnt, wurden bereits einige Schutz- und Umbaumaßnahmen umgesetzt. Eines der Hauptprobleme stellen die landwirtschaftlich genutzten Hangflächen dar. Da die Lössböden mit ihren hohen Anteilen an Schluff besonders zu Verschlämmung und in den Hanglagen zu Erosion neigen, ist dies mit einem Transport von Schlamm verbunden, der zusätzlich in den Wohngebieten Schäden verursachen kann. Die Diskussion über mögliche Änderungen der Landwirtschaft ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen. Einige vorgeschlagenen Maßnahmen sind für die Landwirte nicht ökonomisch. Zum Beispiel würde die Einrichtung von Grünstreifen die Bewirtschaftung des Ackers deutlich erschweren. Eine über das ganze Jahr andauernde Bodenbedeckung durch Zwischenfruchtanbau oder Begrünung sowie eine konservierende Bodenbearbeitung und Reduzierung der Bodenverdichtung könnten mögliche Maßnahmen zur Reduzierung der Erosionsgefährdung sein (Unterseher, 2017). Im Gespräch ist zudem eine Beschränkung des Maisanbaus über die Pachtverträge durch die Stadt Freiburg (BZ, 2019). Ackerflächen, auf denen Mais angebaut werden, gelten als besonders gefährdet, da das Feld lange brach liegt und erst Mitte/Ende Juni eine Bodenbedeckung bildet.

Die hohen Schäden durch die Überflutung des Starkregenereignis am 24.06/25.06.2016 sind aufgrund eines komplexen Zusammenspiels mehrerer Faktoren entstanden. Zu diesen gehören unter anderem die Gebietscharakteristika, kleinräumige Oberflächenstrukturen, Dimensionierung der Kanalisation, Bodenvorfeuchtebedingungen und Niederschlagseigenschaften. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Einzugsgebiete auf die Änderung der Bodenvorfeuchte, Niederschlagseigenschaften und Einbeziehung der Kanalisation reagieren. Anhand der Starkregenanalyse mit veränderten Eingangsdaten wird ersichtlich, dass beide Einzugsgebiete unterschiedlich stark reagieren. Der durchschnittliche maximale Wasserstand hat sich in Freiburg-Hochdorf durch die Änderung der Eingangsparameter nur geringfügig verändert. In Benzhausen sind die Auswirkungen auf die Ergebnisgrößen deutlicher höher. Bei Betrachtung der Durchschnittswerte muss allerdings beachtet werden, dass das Einzugsgebiet von Benzhausen um den Faktor 3 kleiner ist als das von Hochdorf und hier nur sieben Schadensmeldungen vorhanden waren. Im Gegensatz dazu wurden in Hochdorf 41 Schadensmeldungen untersucht. In beiden Gebieten hat die Erhöhung des Niederschlags den höchsten Einfluss auf die Abflussbildung. Neben der Erhöhung der Niederschlagsintensität beeinflussen die Niederschlagsmenge und die Intensitätsverteilung das Abflussgeschehen maßgeblich. Die Modellierung mit verschiedenen Intensitätsverteilungen des 100-jährigen Bemessungsniederschlags zeigt in beiden Einzugsgebieten eine enorme Erhöhung der mittleren maximalen Wasserstände und mittleren gesamten Durchflussmengen. Die Ausgangsmodellierung zeigt eine anfangsbetonte Intensitätsverteilung, weshalb möglichweise die Auswirkungen des Bemessungsniederschlages mit dieser Verteilung geringer sind als mit einer mitten- und endbetonten Verteilung.

Die Komplexität der Entstehung einer Sturzflut wurde bereits von vielen Arbeiten behandelt, unter Anderem haben Bronstert et al. (2017) und Vogel et al. (2017) die Sturzflut am 29.05.2016 in Braunsbach erörtert. Beide Arbeiten bilden die Sturzflut anhand einer retrospektiven Analyse nach und untersuchen die verschiedenen Abflussbildungsprozesse. Die räumliche Variabilität dieser Prozesse ist auf unterschiedliche Gebietseigenschaften oder die räumliche Variabilität des Niederschlags zurückzuführen. Die potentielle Schadenshöhe einer Sturzflut ist von der Leistungsfähigkeit kommunaler Gewässer, der Kanalisation, der Grundstücksentwässerungssysteme sowie von Relief, Topographie, Siedlungsentwässerung und Grundstücksbebauung abhängig. Schäden aufgrund von Starkregenereignissen treten nicht nur in Gewässernähe, sondern auch fernab von Gewässern auf. Bei entsprechender Niederschlagsintensität kann jedes Gebäude potentiell gefährdet sein (Goderbauer-Marchner et al., 2015). Dass Starkregenereignisse auch fernab von Gewässern enorme Schäden verursachen können, ist mit den Ergebnissen der Starkregenanalyse von Freiburg-Hochdorf und Benzhausen belegbar.

Starkregenanalysen sind im Zusammenhang mit dem Klimawandel von großer Bedeutung, da sich die Häufigkeit von Wetterextremen in Zukunft steigern wird. Das Ansteigen der globalen Lufttemperatur führt dazu, dass die Atmosphäre mehr Wasserdampf aufnehmen kann und damit potentiell mehr Niederschlag fällt. In den vergangenen 65 Jahren hat sich die Häufigkeit von Starkniederschlägen der Dauerstufe "24 Stunden" in Deutschland bereits um 25 % erhöht. Die Projektionen regionaler Klimamodelle zeigen, dass eine Zunahme in etwa der gleichen Größenordnung bis zum Jahr 2100 eintreten wird (Becker et al., 2016). Die Starkregenmodellierung ist ein bedeutsames Instrument bei der Starkregenanalyse und Untersuchung des Gefährdungspotentials einzelner Stadtgebiete. Nicht nur die Rekonstruktion von Starkregenereignissen kann zukünftig hilfreich sein, um Städte vor Starkniederschlägen zu schützen. Auch durch präventive Starkregenmodellierungen können besonders gefährdete Gebiete identifiziert und Schutzmaßnahmen geplant werden.

## 6. Schlussfolgerungen

Von Starkregenereignissen ausgelöste Sturzfluten sind hochdynamische Ereignisse, die je nach räumlichem und zeitlichem Auftreten unterschiedlich starke Schäden verursachen können. Zudem wirken sich unterschiedliche Bedingungen auf das Schadenspotential aus. Die Ergebnisse der Starkregenmodellierungen zeigen, dass beide Einzugsgebiete vor allem auf eine Änderung des Niederschlaginputs reagieren. Laut Steinbrich et al. (2016) sind die Eingangsparameter Niederschlag und Bodenfeuchte diejenigen Parameter, die die Ergebnisse eine ereignisbasierte Modellierung besonders stark beeinflussen. Auf beide Einzugsgebiete trifft dies für den Niederschlag zu. Die Änderung der Bodenvorfeuchte hatte auf beide Einzugsgebiete nur einen sehr geringen Einfluss, was womöglich an der hohen simulierten Bodenvorfeuchte lag.

Eine abschließende, zufriedenstellende Modellevaluierung ohne die Verfügbarkeit von belastbaren Messwerten gestaltet sich schwierig. Die wenigen Messwerte der Wasserstände an den Schadensstellen oder auf den Straßen wurden subjektiv aufgenommen und sind daher mit großen Unsicherheiten verbunden. Die Auswertung der Feuerwehreinsatzdaten stellt einen guten Ansatz zur Rekonstruktion der Geschehnisse dar, jedoch kann damit kein umfassendes Bild erstellt werden. Viele Feuerwehreinsätze werden nicht korrekt oder ausreichend dokumentiert, sodass eine zeitliche Einordnung erschwert ist. Zudem helfen sich viele Anwohner selbst, was das räumliche Bild der Einsatzorte verfälscht. Gespräche mit Anwohnern können helfen zusätzliche Informationen über Schadensstellen zu erlangen. Im Fall von Freiburg-Hochdorf hat dies zu einer Bestätigung des Hauptfließweges entlang der Hochdorferstraße geführt. Insgesamt zeigen die Auswertungen, dass das Modell das räumliche Auftreten und die Fließwege des oberflächlich ablaufenden Wassers in beiden Einzugsgebieten korrekt simulieren kann.

Der Vergleich der simulierten Oberflächenabflüsse mit dem mittels der Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler berechneten Abflüssen zeigt, dass die Modellierung plausible Ergebnisse liefert. Eine genauere Bewertung kann allerdings aufgrund der hohen Unsicherheiten nicht getroffen werden. Die Modellierung hat an allen aufgezeichneten Schadstellen ausreichend Oberflächenabfluss simuliert, sodass die aufgezeichneten Schäden damit erklärbar sind mit Ausnahme von einer Schadstelle. Vor allem an Einsatzorten, die fernab der Hauptfließwege liegen, erscheinen die simulierten maximalen Wasserstände und gesamten Durchflussmengen etwas niedrig.

Anhand der zur Verfügung stehenden Daten konnte RoGeR das Abflussgeschehen zufriedenstellend simulieren und auch die räumliche Verteilung der Schadstellen korrekt wiedergeben. Für eine umfassende Bewertung sollten weitere relevante Daten identifiziert und ausgewertet werden.

## Literaturverzeichnis

Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden (Hg.) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung KA5. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. 5. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart.

Agrarmeteorologie Baden-Württemberg (2021): https://www.wetter-bw.de/Internet/AM/NotesB-wAM.nsf/bwweb/fa31cce8b142f059c1257ca7003c9ed1?OpenDocument&TableRow=3.7#3., letzter Zugriff am: 2.12.2021

Anderson M. G., McDonnell J. J. (Hg.) (2006): Encyclopedia of Hydrological Sciences. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.

Badische Zeitung (BZ) (2016): Unwetterartige Regenfälle setzten Hochdorf unter Wasser, Höhl S., 27.06.2016

Badische Zeitung (BZ) (2018): Hochdorf und Benzhausen sollen besser vor Hochwasser geschützt werden, Beule J. L., 20.05.2018

Badische Zeitung (BZ) (2019): Der lange Kampf gegen Überschwemmungen in Hochdorf, Fritsch M., 28.05.2019

Badische Zeitung (BZ) (2020): Hochwasserschutz für Freiburg-Hochdorf bleibt eine Herausforderung, Moritz A. K., 04.11.2020

Baram S., Kurtzman D., Dahan O. (2012): Water percolation through a clayey vadose zone. In: *Journal of Hydrology* 424-425, S. 165–171. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.12.040.

Becker P., Becker A., Dalelane C., Deutschländer T., Junghänel T., Walter A. (2016): Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland. In: *Deutscher Wetterdienst, Geschäftsbericht Klima und Umwelt*.

Beven K. (2012): Rainfall-Runoff Modelling: Wiley.

Beven K. J., Clarke R. T. (1986): On the Variation of Infiltration Into a Homogeneous Soil Matrix Containing a Population of Macropores. In: *Water Resour. Res.* 22 (3), S. 383–388. DOI: 10.1029/WR022i003p00383.

Blume H.-P, Brümmer G. W., Horn R., Kandeler E., Kögel-Knabner I., Kretzschmar R., Stahr K., Wilke B.-M. (2009): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl. 2010. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Borga M., Stoffel M., Marchi L., Marra F., Jakob M. (2014): Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. In: *Journal of Hydrology* 518, S. 194–205. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.022.

Borrell V., Dartus D., Ababou R. (2006): Flash flood modeling with the MARINE hydrological distributed model.

Bremicker M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. In: *Freiburger Schriften zur Hydrologie, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br.* (11).

Bronstert A. (2016): Abflussbildung in der Landschaft. In: Fohrer N., Bormann H., Miegel K., Casper M., Weiler M. (Hg.): Hydrologie. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag (Basics, 4513), S. 143–166.

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. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 61 (3), S. 150–162.

Climate-Data-Center (2021): https://opendata.dwd.de/climate\_environment/CDC/observations\_germany/climate/hourly/precipitation/historical/, letzter Zugriff am: 2.12.2021

Deutscher Wetterdienst (2022): Wetterlexikon. Starkregen, Offenbach: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=102572, letzter Zugriff am: 19.01.2022

Disse M. (2020): Hydrologische Grundlagen. In: Patt, H., Jüpner R. (Hg.): Hochwasser-Handbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 25–102.

Engelhart M., Wagner M., Behnisch J., Blach T., Schwarz M. (2020): Abwassertechnik. In: Urban W. Valentin F. (Hg.): Wasserwesen, Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

England J. F., Velleux M. L., Julien P. Y. (2007): Two-dimensional simulations of extreme floods on a large watershed. In: *Journal of Hydrology* 347 (1-2), S. 229–241. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.09.034.

Fohrer N., Bormann H., Miegel K., Casper M., Weiler M. (Hg.) (2016): Hydrologie. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag (Basics, 4513).

Goderbauer-Marchner G., Sontheimer R. et al. (2015): Leitfaden Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz. Ein Stresstest für die Allgemeine Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz. Stand November 2015. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (Fachinformation, Band 16).

Graham C. B., Woods R. A., McDonnell J. J. (2010): Hillslope threshold response to rainfall: (1) A field based forensic approach. In: *Journal of Hydrology* 393 (1-2), S. 65–76. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.12.015.

Green W. H., Ampt G. A. (1911): Studies on Soil Physics. In: *J. Agric. Sci.* 4 (1), S. 1–24. DOI: 10.1017/S0021859600001441.

Haberlandt U. (2016): Niederschlag. In: Fohrer N., Bormann H., Miegel K., Casper M., Weiler M. (Hg.): Hydrologie. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag (Basics, 4513), S. 47–65.

Hapuarachchi H. A. P., Wang Q. J., Pagano T. C. (2011): A review of advances in flash flood forecasting. In: *Hydrol. Process.* 25 (18), S. 2771–2784. DOI: 10.1002/hyp.8040.

Hörmann G. (2016): Hydrologische Modelle. In: Fohrer N., Bormann H., Miegel K., Casper M., Weiler M. (Hg.): Hydrologie. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag (Basics, 4513).

Horton R. E. (1933): The Role of infiltration in the hydrologic cycle. In: *Trans. AGU* 14 (1), S. 446. DOI: 10.1029/TR014i001p00446.

Jirka G. H., Lang C. (2009): Einführung in die Gerinnehydraulik. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.

Junghänel T., Ertel H., Deutschländer T. (2017): Bericht zur Revision von KOSTRA-DWD-2010. In: *Deutscher Wetterdienst, Geschäftsbericht Klima und Umwelt, Abteilung Hydrometeorologie*. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra\_dwd\_rasterwerte/download/bericht\_revision\_kostra\_dwd\_2010.pdf;jsessio-

nid=7DB881AED66D196A13BEC78D34AC533E.live11042?\_\_blob=publicationFile&v=7.

Kemper S. (2018): Hydraulische Leistungsfähigkeit von Straßenablauf-Aufsätzen. In: *LuFG "Wasserwirtschaft und Wasserbau" Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen Bergische Universität Wuppertal* (Bericht Nr. 22).

Knapp H. V., Durgunoglu A., Ortel T. W. (1991): A review of rainfall-runoff modeling for stormwater management. In: *Ilinois State Water Survey. SWS Contract Report* (516).

KOSTRA-ATLAS: https://opendata.dwd.de/climate\_environment/CDC/grids\_germany/return\_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA\_DWD\_2010R/, letzter Zugriff am: 12.04.2022

Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg (LZN) (o. J.): I4C - Intelligence for Cities: KI-basierte Anpassung von Städten an den Klimawandel - von Daten über Prädiktion zu Entscheidungen.

Liebscher H.-J., Mendel H. G. (2010): Vom empirischen Modellansatz zum komplexen hydrologischen Flussgebietsmodell - Rückblick und Perspektiven -. In: *Bundesanstalt für Gewässerkunde*.

Loucks D. P., van Beek E., Stedinger J. R. (2005): Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications. Paris: UNESCO.

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

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

Maniak U. (2016): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Marchi L., Borga M., Preciso E., Gaume E. (2010): Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. In: *Journal of Hydrology* 394 (1-2), S. 118–133. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.017.

Mein R. G., Larson C. L. (1973): Modeling infiltration during a steady rain. In: *Water Resour. Res.* 9 (2), S. 384–394. DOI: 10.1029/WR009I002P00384.

Olaya V. (2004): A gentle introduction to SAGA GIS. In: The SAGA user group e.V. Edition 1.1.

Patt, H., Jüpner R. (Hg.) (2020): Hochwasser-Handbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Peschke G. (1985): Zur Bildung und Berechnung von Regenabfluss. In: Wissensch. Zeitschrift der TU Dresden 34 (4), S. 195–200.

Piroth K. (2020): Hochwasserschäden. In: Patt, H., Jüpner R. (Hg.): Hochwasser-Handbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Professur für Hydrologie (o. J.): Beschreibung zur Ableitung der Eingangsdatensätze für das Ereignisbasierte N-A-Modell RoGeR und RoGeR\_Dyn.

Professur für Hydrologie (2019): Handbuch RoGeR (N-A-Modell).

Professur für Hydrologie (2021): Handbuch RoGeR\_Dyn.

Rodriguez E. R., Guthörl N. (2021): Hinweise zur Berechnung und Erstellung von Starkregengefahrenkarten. in Hessen Projekt KLIMPRAX Starkregen und Katastrophenschutz in Kommunen.

Roo A. D., Wesseling C. G., van Deursen W. P. A. (2000): Physically based river basin modelling within a GIS: the LISFLOOD model. In: *HydrologicalProcesses* (14), S. 1981–1992.

Scherrer S. (1997): Abflussbildung bei Starkniederschlägen. Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. In: *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich* (147).

Scherrer S., Naef F., Faeh A. O., Cordery I. (2006): Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation.

Sidle R. C., Noguchi S., Tsuboyama Y., Laursen K. (2001): A conceptual model of preferential flow systems in forested hillslopes: evidence of self-organization. In: *Hydrol. Process.* 15 (10), S. 1675–1692. DOI: 10.1002/hyp.233.

Spreafico M., Viviroli D. (Hg.) (2013): Ausgewählte Beiträge zur Abschätzung von Hochwasser und Feststofftransport in der Schweiz. Grundlagen, Methoden, Fallbeispiele. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern (Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 40).

Steinbrich A., Leistert H., Weiler M. (2016): Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. In: *Environ Earth Sci* 75 (21). DOI: 10.1007/s12665-016-6234-9.

Steinbrich A., Leistert H., Weiler M. (2021): RoGeR – ein bodenhydrologisches Modell für die Beantwortung einer Vielzahl hydrologischer Fragen. In: *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 14 (2), S. 94. DOI: 10.3243/kwe2021.02.004.

Steinbrich A., Stölzle M., Weiler M. (2016): Generierung von konsistenten Grundlagendaten zur Berechnung von Starkregenereignissen für eine Starkregengefahrenkartierung in BW. Abschlussbericht für die LUBW zu den im Werkvertrag vereinbarten Leistungen. In: *Professur für Hydrologie – Universität Freiburg*.

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

Thiele W., Büttner M. (2012): Die Verwendung der Euler-2-Verteilung als Niederschlagsinput in NA-Modelle. Erfurt.

Unterseher E. (2017): Welche Erosionsschutzmaßnahmen im Ackerbau helfen bei Starkniederschlägen? In: *Landinfo* (5).

Valentin F., Urban W. (Hg.) (2020): Wasserwesen, Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Viviroli D. (2013): Methoden für die Hochwasserabschätzung. In: Viviroli D. Spreafico M. (Hg.): Ausgewählte Beiträge zur Abschätzung von Hochwasser und Feststofftransport in der Schweiz. Grundlagen, Methoden, Fallbeispiele. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern (Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 40).

Vogel K., Ozturk U., Riemer A., Laudan J., Sieg T., Wendi D., Agarwal A., Rözer V., Korup O., Thieken A. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines "Jahrhundertereignisses". Teil 2: Geomorphologische Prozesse und Schadensanalyse. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 61 (3), S. 163–175.

Weiler M. (2016): Einfluss von Landnutzung und Landbedeckung auf den Wasserkreislauf. In: Fohrer N., Bormann H., Miegel K., Casper M., Weiler M. (Hg.): Hydrologie. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag (Basics, 4513), S. 179–190.

Weiler M., Flühler H. (2004): Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. In: *Geoderma* 120 (1-2), S. 137–153. DOI: 10.1016/j.geoderma.2003.08.014.

Weiler M., McDonnell J. (2004): Virtual experiments: a new approach for improving process conceptualization in hillslope hydrology. In: *Journal of Hydrology* 285 (1-4), S. 3–18. DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00271-3.

Weiler M., Miegel K. (2016): Globaler und regionaler Wasserkreislauf. In: Fohrer N., Bormann H., Miegel K., Casper M., Weiler M. (Hg.): Hydrologie. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag (Basics, 4513), S. 29–45.

Weiler M., McDonnell J. J., Tromp-van Meerveld I., Uchida T. (2006): Subsurface Stormflow. In: Anderson M. G., McDonnell J. J. (Hg.): Encyclopedia of Hydrological Sciences. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.

Wessolek G. (2016): Bodenwasserhaushalt. In: Fohrer N., Bormann H., Miegel K., Casper M., Weiler M. (Hg.): Hydrologie. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag (Basics, 4513), S. 69–90.

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

## Anhang

Tabelle A. 1: RoGeR-ID je Landnutzungsklasse (Professur für Hydrologie, o.J.)

Landnutzungsklasse	RoGeR Codes
Teilweise oder ganz versiegelte Flächen	0
(Siedlung, Industrie, Infrastruktur)	
Ackerland	5
Weinbauflächen	6
Obst- und Beerenobst	7
Grünland	8
Komplexe Parzellenstruktur	9
Laubwälder	10
Mischwälder	11
Nadelwälder	12
Feuchtflächen	13
Wasserfläche See	14
Baumart unbekannt	15
Wasserfläche Fluss	20

Tabelle A. 2: Feinbodenklassen nach KA5 und Bodenart-ID für RoGeR

KA5	BA ID	KA5	BA ID
Ss	17	Uu	36
S12	13	Uls	31
S13	14	Us	32
S14	15	Ut2	33
Slu	16	Ut3	34
St2	18	Ut4	35
St3	19	Tt	27
Su2	20	Tl	23
Su3	21	Tu2	28
Su4	22	Tu3	29
Ls2	6	Tu4	30
Ls3	7	Ts2	24
Ls4	8	Ts3	25
Lt2	9	Ts4	26
Lt3	10	Н	2
Lts	11	Hn	3
Lu	12	Fh	1

Tabelle A. 3: Makroporenausstattung für Landnutzungsklassen

Landnutzungsklasse	Dichte	Länge	Dichte
	vertikal	vertikal	hangparallel
Ackerland	75	30	125
Weinbauflächen	75	50	125
Obst- und Beerenobst	100	50	125
Grünland	100	80	125
Komplexe Parzellenstruktur	100	30	125
Laubwälder	150	50	150
Mischwälder	150	50	150
Nadelwälder	150	30	150
Feuchtflächen	100	30	125
Wasserfläche	0	0	0

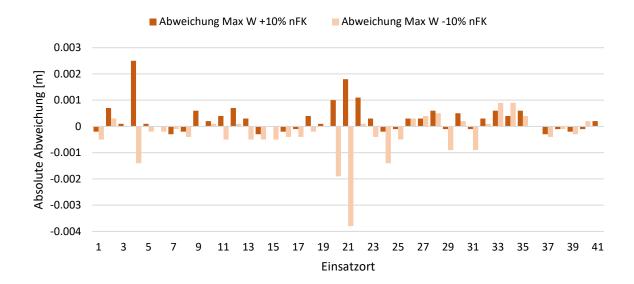


Abbildung A. 1: Absolute Abweichung der simulierten maximalen Wasserstände der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf zwischen der Ausgangsmodellierung und veränderten Bodenvorfeuchtebedingungen

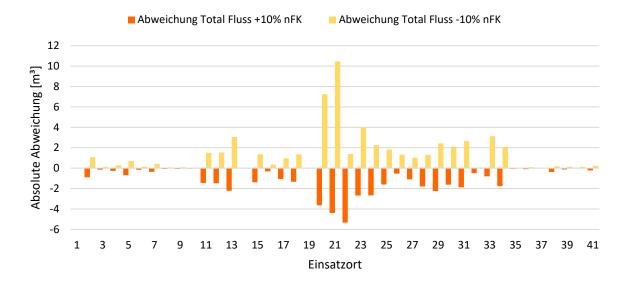


Abbildung A. 2: Absolute Abweichung der simulierten gesamten Durchflussmengen der Einsatzstellen in Freiburg-Hochdorf zwischen der Ausgangsmodellierung und veränderten Bodenvorfeuchtebedingungen

# Liste der verwendeten Akürzungen

Name	Symbol	Einheit
Aktuelle Bodenfeuchte	$\mathbf{Bf}_{akt}$	%nFK
am Aufsatz vorbeifließender Abfluss	$Q_s$	$m^3/s$
Amtliches Digitales Wasserwirtschaftliches Gewässernetz	AWGN	-
auf die Aufsatzbreite bezogene mittlere Fließgeschwindigkeit	VA	m/s
auf die Aufsatzbreite bezogene mittlere Wassertiefe	$h_{\rm A}$	m
Aufnahmekapazität des Straßenablauf-Aufsatzes	$Q_1$	$m^3/s$
aufsatzbezogene Froude-Zahl	$Fr_A$	
Ausrollgrenze	ARG	%nFK
benetzter Umfang	U	m
Bodenkarte	BK 50	
Bodenkundliche Kartieranleitung	KA 5	
Bodenübersichtskarte	BÜK	
Breite des Straßenablauf-Aufsatzes	$B_{A}$	m
Deutscher Wetterdienst	DWD	
Differenz Ausrollgrenze-Schrumpfungsgrenze	$D_{ARG\_SG}$	%nFK
Digitales Geländemodell	DGM	
Durchfluss	Q	$m^3/s$
effektive Porosität	$\mathbf{P}_{\mathrm{eff}}$	
Erdbeschleunigung	g	m/s <sup>2</sup>
Fließgeschwindigkeit	V	m/s
frei drainierbares Porenvolumen	LK	
frontaler Zufluss auf die Breite des Pultaufsatzes	Qf	$m^3/s$
Grundwasserneubildungs-Modell Baden-Württemberg	GWN-BW	
Horton'scher Oberflächenabfluss	HOA	
hydraulischer Radius	Rh	m
Hydrogeologische Karte Baden-Württemberg	HK 50	
Landesanstalt für Umwelt, Messung und Naturschutz Baden-Württemberg	LUBW	
Länge des Straßenablauf-Aufsatzes	LA	m
Langsamer Zwischenabfluss	Matrix-ZA	
Manning-Strickler Beiwert	$\mathbf{k}_{\mathrm{st}}$	$m^{1/3}/s$
Maximale Risstiefe	$TRL_{max}$	cm
Niederschlags-Abflussmodell	N-A-Modell	

nutzbare Feldkapazität	nFK	
Öffnungsfläche des Straßenablauf-Aufsatzes	$\mathbf{A}_0$	$\mathrm{m}^2$
Parameter zur Berücksichtigung der Strebenanordnung	S	
Querschnittsfläche	A	$\mathrm{m}^2$
Regierungspräsidium Freiburg Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau	LGRB	
Runoff Generation Research Model	RoGeR	
Sättigungsflächenabfluss	SFA	
Schneller Zwischenabfluss	MP-ZA	
Schrumpfungsgrenze	SG	%nFK
Sohlgefälle	$I_0$	
Straßenbreite	W	m
Tiefenperkolation	TP	
Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg	WaBoA	
Zwischenabfluss	ZA	

Datum, Ort

# Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich,
dass ich die eingereichte Masterarbeit selbständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommenen Inhalte als solche kenntlich gemacht habe.
Die eingereichte Masterarbeit ist oder war weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens.

Unterschrift