

Schriftenreihe Band 2 | 2018

# wasser infrastruktur ressourcen



**Erarbeitung gebietspezifischer Anwendungsempfehlungen für bi-direktional gekoppelte 1D-2D-Überflutungsberechnungen**

Dissertation

wasser infrastruktur ressourcen



**Technische Universität Kaiserslautern**

Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung  
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft  
Zentrum für Innovative AbWassertechnologien

Paul-Ehrlich-Straße  
67663 Kaiserslautern  
☎ +49 631 205-3685  
✉ +49 631 205-3905  
[www.bauing.uni-kl.de/wir](http://www.bauing.uni-kl.de/wir)



ISSN: 2570-1460 | ISBN: 978-3-95974-087-6

Erarbeitung gebietspezifischer Anwendungsempfehlungen  
für bi-direktional gekoppelte 1D-2D-Überflutungsberechnungen

2  
wir

# **Erarbeitung gebietsspezifischer Anwendungsempfehlungen für bi-direktional gekoppelte 1D-2D-Überflutungsberechnungen**

vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Hagen Hürter**

**Dekan**

Prof. Dr. Oliver Kornadt

**Prüfungskommission**

Vorsitzende

Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz

1. Berichterstatter

Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt

2. Berichterstatter

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Rauch

Datum der Prüfung

19.04.2018

Kaiserslautern 2018

(D 386)

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen · Band 2

Herausgeber: Institut Wasser Infrastruktur Ressourcen

Technische Universität Kaiserslautern  
Paul-Ehrlich-Straße 14  
67663 Kaiserslautern

Verfasser: Hürter, Hagen

Verlag: Technische Universität Kaiserslautern

Druck: Technische Universität Kaiserslautern  
Abteilung 5.6 Foto-Repro-Druck

D-386

© Institut Wasser Infrastruktur Ressourcen · Kaiserslautern 2018

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 2570-1460

ISBN 978-3-95974-087-6

## Danksagung

Zu Beginn dieser Arbeit möchte ich, bevor die inhaltliche Auseinandersetzung aufgenommen wird, einigen Menschen danken, die für die Arbeit an meiner Dissertation und darüber hinaus in ganz unterschiedlicher Weise bedeutsam waren und sind.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt, der mich nicht nur bei meiner Arbeit stets kritisch, konstruktiv, immer wohlwollend und unterstützend begleitet hat.

Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Rauch für die Bereicherung meiner Arbeit durch die Übernahme des Korreferats.

Frau Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz für die bereitwillige Übernahme des Prüfungsvorsitz.

Allen Studierenden, die mich als wissenschaftliche Hilfskräfte und Absolventen bei meiner Arbeit am Fachgebiet und bei der Erarbeitung der vorliegenden Dissertation unterstützt haben.

Meinen ehemaligen Projektpartnern für die Bereitstellung von Grundlagendaten und die gesammelten Erfahrungen in der gemeinsamen Bearbeitung von Forschungsprojekten.

Meinen Kollegen des Fachbereichs BI, insbesondere der Fachgebiete „Siedlungswasserwirtschaft“ und „Ressourcenorientierte Abwasserbehandlung“, für das einzigartige Arbeitsklima sowie den fachlichen und privaten Austausch.

Zum Schluss möchte ich meinen Eltern Bärbel und Helmut Hürter sowie meiner Partnerin Sofie für ihre bedingungslose Unterstützung in allen Bereichen danken.



## Kurzfassung

Vor dem Hintergrund einer Häufung schadensträchtiger Ereignisse in den letzten Jahren und einer zukünftig möglichen Zunahme extremer Niederschläge infolge des Klimawandels sind mittlerweile methodische Ansätze des Risikomanagements im Rahmen einer kommunalen Überflutungsvorsorge etabliert. Zu der dafür erforderlichen ortsbezogenen Analyse konkreter Überflutungsgefährdungen existieren aktuell verschiedene methodische Ansätze unterschiedlicher Komplexität und Aussagekraft. Bestehende Anwendungsempfehlungen und vergleichende Untersuchungen stellen die integrale Berechnung des oberirdischen und unterirdischen Abflusses mithilfe bi-direktional gekoppelter 1D/2D-Abflussmodelle als den methodisch umfassendsten und aussagekräftigsten Ansatz zur Durchführung entsprechender Analysen dar. Die hohe Komplexität dieser Modelle schlägt sich in einer Vielzahl an Einflussgrößen nieder, welche sich auf die Berechnungsergebnisse auswirken können. Zusätzlich ist die Kalibrierung von Modellen zur Überflutungssimulation aufgrund der oftmals fehlenden „Messdaten“ zum realen Überflutungsgeschehen stark begrenzt. Aufgrund fehlender konkreter Vorgaben und Empfehlungen zur Anwendung der Methode bzw. zur Modellkonfiguration ist die Vergleichbarkeit von Analyseergebnissen und Gefährdungsaussagen derzeit nicht gegeben.

Die Ziele der vorliegenden Arbeit sind die Identifizierung und Quantifizierung von Einflussgrößen und die Erarbeitung entsprechender Anwendungsempfehlungen zur Erhöhung der Vergleichbarkeit beim Einsatz bi-direktional gekoppelter 1D/2D-Abflussmodelle zur überflutungsbezogenen Gefährdungsanalyse.

Für zwei Modellgebiete, die sich hinsichtlich relevanter Gebietseigenschaften stark unterscheiden, wurden bi-direktional gekoppelte 1D/2D-Abflussmodelle mit einer Referenzkonfiguration erstellt und mithilfe von Daten zu historischen Überflutungsereignissen bestmöglich plausibilisiert. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse an den beiden Referenzmodellen wurde eine große Zahl an Zusammenhängen und Auswirkungen durch Auslenkung relevanter Einflussgrößen identifiziert und quantifiziert. Um eine anwendungsbezogene Einschätzung zu gewährleisten wurden Vergleichsindikatoren entwickelt, die nicht nur die Berücksichtigung berechneter Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten, sondern auch eine Bewertung der Einflussgrößen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Gefährdungsaussage ermöglichen.

Anhand der Ergebnisse wurden gebietsspezifische Anwendungsempfehlungen für den Einsatz bi-direktional gekoppelter 1D/2D-Abflussberechnungen zur Gefährdungsanalyse abgeleitet. Die erarbeiteten Anwendungsempfehlungen tragen zu einer Erhöhung der Vergleichbarkeit künftiger Analysen der ortsbezogenen Überflutungsgefährdung bei.

Die entwickelte Untersuchungsmethodik kann bei künftigen Ergänzungen oder Konkretisierungen der Anwendungsempfehlungen, z.B. anhand der Untersuchung weiterer Modellgebiete oder neuer Einflussgrößen, eingesetzt werden.



## Abstract

The increase in cases of damage in recent years and the possible increase in heavy rain-falls causing flooding in the future have led to the development of risk management methods within the context of precautionary strategies against flooding in urban areas. Currently, various analysis methods are used to assess urban flood risk, which differ according to their complexity and their accuracy. Following existing recommendations and the results of comparative analyses, the most comprehensive method with the highest accuracy is the one based on bi-directionally coupled 1D/2D-models to integrally simulate the flow processes on the surface and in the sewer system. Because of the complexity of these models there are many variables and model parameters that can influence the simulation results and the flood risk assessment. Besides, "measured data" concerning urban flooding on which the calibration of flooding models could be based are usually missing. At present, there is no comparability of the results of flood risk analyses because appropriate recommendations for the application of the method are lacking.

The objectives of this research are the identification and the quantification of variables and model parameters as well as the derivation of recommendations for the application of bi-directionally coupled 1D/2D-models for urban flood risk assessment.

Using a reference configuration, bi-directionally coupled 1D/2D-models have been generated in two very different study areas. These reference models have been made plausible by using data of historical flooding events. The two models have been subjected to a sensitivity analysis by using varying model parameters and methodical approaches. To ensure an application-oriented conclusion indicators have been developed that take not only the calculated flood levels and flow velocities into account but also the derivable flood risk.

The sensitivity analysis shows many dependencies and impacts on the simulation results. These have been identified and quantified in a detailed way. Based on these findings site-specific recommendations for the application of bi-directionally coupled 1D/2D-flow calculations for flood risk assessment have been derived. The recommendations thus developed contribute to an increase in the comparability of future analyses of urban flood risk.

The presented methodology can be used for future studies carried out to derive further additions to the here developed recommendations. This can take place by investigating additional study areas or parameters.



## Inhaltsverzeichnis

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>IV</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>X</b>
<b>VERZEICHNIS DER ANHÄNGE .....</b>	<b>XII</b>
<b>1 EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1 Veranlassung und Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung und Schwerpunkt der Arbeit .....	2
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit .....	3
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN UND KENNTNISSTAND .....</b>	<b>5</b>
2.1 Begriffliche Abgrenzung: Überflutungsbezogene Gefahr und Gefährdung.....	5
2.2 Abflussmodelle in der Siedlungsentwässerung .....	6
2.2.1 Allgemeine Grundlagen .....	6
2.2.2 Modelle zur Abflussberechnung im Kanalnetz .....	8
2.2.3 Hydraulische Modelle zur Abflussberechnung auf der Oberfläche .....	10
2.2.4 Modelle mit Abbildung der Kopplung zwischen Oberfläche und Kanalnetz .....	11
2.3 Methoden und Modelle zur Analyse von Überflutungsgefährdung .....	13
2.3.1 Überblick zu Regelwerk und Leitfäden.....	13
2.3.2 Handlungsfeld „Kommunale Überflutungsvorsorge“ .....	15
2.3.3 Analyse von Gefährdung, Schadenspotenzial und Risiko im Kontext von Starkregenüberflutungen.....	16
2.3.4 Methodische Ansätze der Gefährdungsanalyse.....	18
2.3.5 Gefährdungsklassifizierung.....	20
2.4 Kenntnisstand und Wissensdefizite bezüglich der Vergleichbarkeit von Ergebnissen verschiedener Methoden der Gefährdungsanalyse .....	22
2.4.1 Vergleich verschiedener Methoden der Gefährdungsanalyse.....	22
2.4.2 Kenntnisstand zu Einflussgrößen innerhalb der bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung .....	25
2.4.3 Untersuchungen und Empfehlungen zum Ansatz der Niederschlagsbelastung .....	27
2.5 Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands.....	28

<b>3</b>	<b>GRUNDLAGEN DER UNTERSUCHUNG .....</b>	<b>30</b>
3.1	Betrachtete Modellgebiete.....	30
3.1.1	Modellgebiet 1 (flache Topografie, urban) .....	30
3.1.2	Modellgebiet 2 (bewegte Topografie, ländlich) .....	32
3.2	Verwendete Datengrundlage .....	34
3.2.1	2D-Oberflächenmodell .....	35
3.2.2	Daten zu abflussbeeinflussenden Oberflächeneigenschaften.....	35
3.2.3	1D-Kanalnetzmodell .....	36
3.2.4	Aufzeichnungen zu historischen Überflutungsereignissen .....	37
3.3	Verwendete Software und hydraulische Ansätze.....	37
3.3.1	Berechnung des Oberflächenabflusses.....	37
3.3.2	Berechnung des Abflusses im Kanalnetz.....	40
3.3.3	Hydraulische Modellierung des Kopplungspunktes (1D/2D).....	40
<b>4</b>	<b>UNTERSUCHUNGSMETHODIK .....</b>	<b>43</b>
4.1	Aufbau des Referenzmodells .....	44
4.1.1	Auflösung des Oberflächenmodells .....	44
4.1.2	Abbildung von abflussbeeinflussenden Oberflächeneigenschaften .....	45
4.1.3	Abflussbildungsansatz .....	50
4.1.4	Abflusskonzentration.....	50
4.1.5	Niederschlagsbelastung.....	51
4.1.6	Kopplung zwischen 1D- und 2D-Abflussmodell .....	53
4.2	Plausibilisierung des Referenzmodells .....	58
4.3	Definition von Vergleichsindikatoren (quantitativ/qualitativ) .....	59
4.3.1	Wasserstand auf der Oberfläche .....	60
4.3.2	Fließgeschwindigkeit auf der Oberfläche .....	62
4.3.3	Indikatoren zur objektbezogenen Überflutungsgefährdung .....	63
4.3.4	Reine Sensitivitätsindikatoren .....	65
4.4	Definition der betrachteten Einflussgrößen .....	65
4.4.1	Einfluss der Auflösung des triangulierten Oberflächenmodells (Variante 1).....	65
4.4.2	Einfluss der Abbildung des Kopplungspunktes (Variante 2).....	67
4.4.3	Einfluss des hydraulischen Ansatzes zur Kopplung 1D/2D (Variante 3).....	68
4.4.4	Einfluss der Abflusskonzentration (Variante 4).....	70
4.4.5	Einfluss der Oberflächenrauheit (Variante 5).....	71
4.4.6	Einfluss unterschiedlicher Abflussbildungsansätze (Variante 6) .....	72

---

4.4.7	Einfluss der unterschiedlichen Modellierung von Oberflächenstrukturen (Variante 7).....	72
<b>5</b>	<b>SENSITIVITÄTSANALYSE – DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE.</b>	<b>74</b>
5.1	Ergebnisse des Referenzmodells.....	74
5.2	Sensitivitätsanalyse zu den Modellvarianten.....	88
5.2.1	Einfluss der Auflösung des Oberflächenmodells (Variante 1).....	88
5.2.2	Einfluss der Abbildung des Kopplungspunktes (Variante 2).....	95
5.2.3	Einfluss des hydraulischen Ansatzes zur Kopplung 1D/2D (Variante 3) .....	105
5.2.4	Einfluss der Abflusskonzentration (Variante 4).....	122
5.2.5	Einfluss der Oberflächenrauheit (Variante 5).....	130
5.2.6	Einfluss unterschiedlicher Abflussbildungsansätze (Variante 6) .....	134
5.2.7	Einfluss der unterschiedlichen Modellierung von Oberflächenstrukturen (Variante 7).....	138
5.3	Vergleichende Betrachtung der Sensitivitäten.....	148
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	158
<b>6</b>	<b>ABGELEITETE ANWENDUNGSEMPFEHLUNGEN .....</b>	<b>165</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>169</b>
7.1	Zusammenfassung .....	169
7.2	Fazit und Ausblick .....	170
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>173</b>
	<b>ANHANG.....</b>	<b>182</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Interaktion zwischen Kanalnetz- und Oberflächenabfluss (nach Schmitt et al. 2004).....	12
Abbildung 2-2:	Überflutungsschutz und Überflutungsvorsorge als kommunale Gemeinschaftsaufgabe (DWA 2008) .....	15
Abbildung 2-3:	Beispiel einer Karte (Kartenausschnitt) mit kombinierter Darstellung ereignisbezogener Wasserstände (Überflutungsgefahren) sowie gebäude- und anlagenbezogener Schadenspotenziale (Illgen 2015 in DWA 2016) .....	17
Abbildung 2-4:	Beispiel zur verbalen Verknüpfung der Bewertungen von Überflutungsgefahr und Schadenspotenzial zum Überflutungsrisiko in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit der Niederschlagsbelastung (nach DWA 2016) .....	17
Abbildung 2-5:	Ergebnisbeispiel einer systematischen Risikoklassifizierung (Zusammenführung von Gefahren- bzw. Gefährdungs- und Schadenspotenzialklassen zu Risikoklassen) (Illgen 2015 in DWA 2016).....	18
Abbildung 3-1:	Lage von Modellgebiet 1 innerhalb des Einzugsgebiets des Abwasserpumpwerks.....	31
Abbildung 3-2:	Modellgebiete 1 und 2 – Flächenanteile nach Grün-, Verkehrs-, Hof- und Dachfläche .....	31
Abbildung 3-3:	Modellgebiet 1 mit Darstellung des Geländemodells, der Gebäude und Straßen sowie der Knoten und Haltungen des Kanalnetzmodells.....	32
Abbildung 3-4:	Modellgebiet 2 mit Darstellung des digitalen Geländemodells, des Außengebiets (Osten) und des Siedlungsgebiets (Südwesten), der Straßen und Gebäude im Siedlungsgebiet sowie der Lage des oberirdischen Rückhaltebeckens.....	33
Abbildung 3-5:	Siedlungsgebiet von Modellgebiet 2 mit Darstellung des Geländemodells, der Gebäude und Straßen sowie der Knoten und Haltungen des Kanalnetzmodells.....	34

Abbildung 3-6:	Ergebnis einer nach Shewchuk erweiterten Delaunay-Triangulation.....	35
Abbildung 3-7:	Feinnetzmodell mit Teileinzugsgebieten unterschiedlicher Flächenart.....	36
Abbildung 3-8:	Wasserstandänderung pro Zeitschritt für ein Oberflächenelement .....	39
Abbildung 4-1:	Bruchkante (Breakline) zur Festlegung der Dreieckskanten während des Triangulationsprozesses (nach Innovyze 2013) .....	46
Abbildung 4-2:	Schemazeichnung Triangulation im Bordsteinbereich mit einer Bruchkante an der Bordsteinkante (Querschnitt) .....	47
Abbildung 4-3:	Schemazeichnung Triangulation im Bordsteinbereich modifizierter Ansatz mit Doppelbruchkante (Querschnitt).....	48
Abbildung 4-4:	Q-H-Beziehung an den Straßenabläufen im Referenzmodell - Kanaleintritt .....	56
Abbildung 4-5:	Q-H-Beziehung an den Straßenabläufen im Referenzmodell -Kanalaustritt.....	56
Abbildung 4-6:	Q-H-Beziehung an den Schächten im Referenzmodell - Kanaleintritt.....	57
Abbildung 4-7:	Q-H-Beziehung an Schächten und Straßen-/Hofabläufen im Referenzmodell .....	57
Abbildung 4-8:	Berechnete (A) und beobachtete (B) Wasserstände für das historische Ereignis .....	58
Abbildung 4-9:	Definition der angeströmten und der beiden seitlichen Kanten des Straßenablaufs als Wehrbreite (tandler.com GmbH 2016).....	69
Abbildung 5-1:	MG1 Referenzmodell, maximale Wasserstände und gebäudespezifische Gefährdung .....	75
Abbildung 5-2:	MG1 Referenzmodell, maximale Fließgeschwindigkeiten und gebäudespezifische Gefährdung.....	76
Abbildung 5-3:	MG2 Referenzmodell - maximale Wasserstände mit Darstellung der gebäudespezifischen Gefährdung.....	77
Abbildung 5-4:	MG2 Referenzmodell - maximale Fließgeschwindigkeiten ab 10cm Wasserstand mit Darstellung der gebäudespezifischen Gefährdung.....	78

Abbildung 5-5:	Ganglinien der Wassermenge auf der Oberfläche in Modellgebiet 1 (oben) und im Siedlungsgebiet von Modellgebiet 2 (unten) .....	82
Abbildung 5-6:	Ganglinien des Kanaleintritts bzw. -austritts in Modellgebiet 1 (oben) und im Siedlungsgebiet von Modellgebiet 2 (unten) .....	85
Abbildung 5-7:	Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) in den Modellgebieten 1 und 2 für den Referenzzustand .....	87
Abbildung 5-8:	Höhenunterschied zwischen den Oberflächenmodellen – Modellgebiet 1 – Referenzmodell/Variante 1. Rot: Variante 1 höher als Referenz, Grün: Referenz höher als Variante 1.....	89
Abbildung 5-9:	Schematische Darstellung der Abbildung von lokalen Vertiefungen (links) und Erhöhungen (rechts) bei unterschiedlicher Auflösung des Oberflächenmodells .....	90
Abbildung 5-10:	Höhenunterschied zwischen den Oberflächenmodellen – Tiefliegender Hauseingang in Modellgebiet 1 (links) und Böschung senkrecht zur Hangneigung in Modellgebiet 2 (rechts).....	90
Abbildung 5-11:	Schematische Darstellung der Geländehöhe im Gebäudekantenbereich bei unterschiedlichen Auflösungen des Oberflächenmodells.....	91
Abbildung 5-12:	Bilanz des Austauschvolumens (links) und Austauschvolumen nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 1 in beiden Modellgebieten .....	94
Abbildung 5-13:	Bilanz des Austauschvolumens (links) und Austauschvolumen nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 2a in beiden Modellgebieten .....	97
Abbildung 5-14:	Bilanz des Austauschvolumens (links) und Austauschvolumen nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 2b in beiden Modellgebieten .....	100
Abbildung 5-15:	Bilanz des Austauschvolumens (links) und Austauschvolumen nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 2c in beiden Modellgebieten .....	103

Abbildung 5-16: Veränderte Q-H-Beziehung an den Straßen- und Hofabläufen in V3a im Vergleich zum Referenzmodell (negative Werte: Kanalaustritt, positive Werte: Kanaleintritt) .....	106
Abbildung 5-17: Veränderte Q-H-Beziehung an den Schächten in V3a im Vergleich zum Referenzmodell (links: Kanalaustritt, rechts: Kanaleintritt) .....	106
Abbildung 5-18: Q-H-Beziehung an Schächten und Straßen-/Hofabläufen in V3a im Vergleich zum Referenzmodell (negative Werte: Kanalaustritt, positive Werte: Kanaleintritt) .....	107
Abbildung 5-19: Bilanz des Austauschvolumens (links) und Austauschvolumen nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 3a in beiden Modellgebieten .....	108
Abbildung 5-20: Kanaleintritt und –austritt über die Zeit nach Kopplungspunkten und in Summe – Referenz und Variante 3a .....	109
Abbildung 5-21: Q-H-Beziehungen für den Kanaleintritt an den Straßenabläufen in Referenzmodell und Variante 3b .....	112
Abbildung 5-22: Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 3b in beiden Modellgebieten .....	113
Abbildung 5-23: Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 3c in beiden Modellgebieten .....	116
Abbildung 5-24: Hydraulische Abbildung der Schächte in Variante 3d .....	119
Abbildung 5-25: Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 3d in beiden Modellgebieten .....	120
Abbildung 5-26: Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 4a in beiden Modellgebieten .....	123
Abbildung 5-27: Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) für	

	Referenzzustand und Variante 4b in beiden Modellgebieten .....	127
Abbildung 5-28:	Bilanz des Austauschvolumens für Referenzzustand und Varianten 5a, 5b und 5c in beiden Modellgebieten .....	133
Abbildung 5-29:	Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Varianten 6a und 6b in beiden Modellgebieten .....	137
Abbildung 5-30:	Bilanz des Austauschvolumens für Referenzzustand und Varianten 7a bis 7d in beiden Modellgebieten.....	141
Abbildung 5-31:	Bilanz des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten für Referenzzustand und Varianten 7a bis 7d in beiden Modellgebieten .....	142
Abbildung 5-32:	Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 7e in beiden Modellgebieten .....	147
Abbildung 5-33:	Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefahr (Wasserstand) alle Varianten - Modellgebiet 1 .....	150
Abbildung 5-34:	Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefahr (Wasserstand) alle Varianten - Modellgebiet 2 .....	150
Abbildung 5-35:	Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefahr (Fließgeschwindigkeit) alle Varianten - Modellgebiet 1.....	152
Abbildung 5-36:	Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefahr (Fließgeschwindigkeit) alle Varianten - Modellgebiet 2.....	152
Abbildung 5-37:	Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefährdung (Wasserstand) als Anzahl Gebäude je Gefährdungsklasse - alle Varianten - Modellgebiet 1 .....	153
Abbildung 5-38:	Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefährdung (Wasserstand) als Anzahl der Gebäude je Gefährdungsklasse - alle Varianten - Modellgebiet 2.....	153
Abbildung 5-39:	Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefährdung (Wasserstand) als summierte Klassenänderungen an allen Gebäuden - alle Varianten - Modellgebiet 1.....	154
Abbildung 5-40:	Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefährdung (Wasserstand) als summierte Klassenänderungen an allen Gebäuden - alle Varianten - Modellgebiet 2.....	155

Abbildung 5-41: Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefährdung (Wasserstand) als summierte Klassenänderungen an allen Gebäuden - alle Varianten - Modellgebiet 2 .....	156
Abbildung 5-42: Sensitivitätsvergleich Austauschvolumen Kopplungspunkte alle Varianten - Modellgebiet 1 .....	157
Abbildung 5-43: Sensitivitätsvergleich Austauschvolumen Kopplungspunkte alle Varianten - Modellgebiet 2 .....	158
Abbildung 5-44: Auswirkungspunkte je Modellvariantengruppe und Modellgebiet als gestapelte Säulen .....	161

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Methoden und Arbeitsschritte der Analyse zur Überflutungsgefährdung (verändert nach (Schmitt 2014 bzw. DWA 2016)) .....	19
Tabelle 2-2:	Gefahrenklassen in Abhängigkeit ermittelter Wasserstände auf der Oberfläche aus Überflutungsberechnungen (DWA 2016) .....	21
Tabelle 2-3:	Potenzielle Gefahren für Leib und Leben sowie Infrastruktur und Objekte bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten (nach LUBW 2016).....	21
Tabelle 2-4:	Potenzielle Gefahren für Infrastruktur und Objekte bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten (nach LUBW 2016) .....	22
Tabelle 4-1:	Flächenspezifische Ansätze zur Oberflächenrauheit für die Referenzmodelle .....	49
Tabelle 4-2:	Veränderung des Summenindikators zur wasserstandbedingten Überflutungsgefährdung durch verschiedene Niederschlagsansätze .....	52
Tabelle 4-3:	Kenndaten zum Kopplungspunkt Schacht .....	54
Tabelle 4-4:	Kenndaten zum Kopplungspunkt Straßenablauf/Hofablauf.....	55
Tabelle 4-5:	Übersicht Vergleichsindikatoren .....	60
Tabelle 4-6:	Klassifizierung des Vergleichsindikators „maximaler Wasserstand auf der Fläche“ .....	61
Tabelle 4-7:	Gewichtungsfaktoren nach Gefahren- und Gefährdungsklassen zur Bestimmung der Summenindikatoren .....	61
Tabelle 4-8:	Klassifizierung des Vergleichsindikators „maximale Fließgeschwindigkeit in der Fläche“ .....	62
Tabelle 5-1:	Werte der Gefährdungsindikatoren im Referenzzustand Modellgebiete 1 und 2 .....	79
Tabelle 5-2:	Werte der Gefahrenindikatoren im Referenzzustand Modellgebiete 1 und 2 .....	80

Tabelle 5-3:	Summen und Bilanzen zu Kanaleintritt und –austritt für die Modellgebiete im Referenzzustand nach Arten der Kopplungspunkte und als Gesamtbilanz .....	87
Tabelle 5-4:	Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 1 für beide Modellgebiete.....	92
Tabelle 5-5:	Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 2a für beide Modellgebiete.....	98
Tabelle 5-6:	Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 2b für beide Modellgebiete .....	101
Tabelle 5-7:	Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 2c für beide Modellgebiete .....	104
Tabelle 5-8:	Werte der Vergleichsindikatoren für Referenzzustand und Variante 3a für beide Modellgebiete .....	110
Tabelle 5-9:	Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 3b für beide Modellgebiete .....	114
Tabelle 5-10:	Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 3c für beide Modellgebiete .....	117
Tabelle 5-11:	Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 3d für beide Modellgebiete .....	121
Tabelle 5-12:	Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 4a für beide Modellgebiete.....	124
Tabelle 5-13:	Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 4b für beide Modellgebiete .....	128
Tabelle 5-14:	Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und den Varianten zur Oberflächenrauheit für beide Modellgebiete.....	132
Tabelle 5-15:	Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und in den Varianten 6a und 6b für beide Modellgebiete.....	135
Tabelle 5-16:	Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und den Varianten 7a bis 7d für beide Modellgebiete .....	143
Tabelle 5-17:	Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 7e für beide Modellgebiete.....	146
Tabelle 5-18:	Kurzübersicht der betrachteten Modellvarianten .....	149
Tabelle 5-19:	Darstellung der Auswirkungen der Varianten auf ausgewählte Indikatoren in den beiden Modellgebieten .....	159

## Verzeichnis der Anhänge

<b>Anhang A 1 Gefährdungskarten Modellgebiet 1 .....</b>	<b>182</b>
A.1.1 Referenzmodell – Gefährdungskarte Wasserstand .....	182
A.1.2 Referenzmodell – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	183
A.1.3 Variante 1a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	184
A.1.4 Variante 1a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	185
A.1.5 Variante 2a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	186
A.1.6 Variante 2a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	187
A.1.7 Variante 2b – Gefährdungskarte Wasserstand .....	188
A.1.8 Variante 2b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	189
A.1.9 Variante 2c – Gefährdungskarte Wasserstand .....	190
A.1.10 Variante 2c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	191
A.1.11 Variante 3a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	192
A.1.12 Variante 3a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	193
A.1.13 Variante 3b – Gefährdungskarte Wasserstand.....	194
A.1.14 Variante 3b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	195
A.1.15 Variante 3c – Gefährdungskarte Wasserstand .....	196
A.1.16 Variante 3c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	197
A.1.17 Variante 3d – Gefährdungskarte Wasserstand .....	198
A.1.18 Variante 3d – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	199
A.1.19 Variante 4a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	200
A.1.20 Variante 4a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	201
A.1.21 Variante 4b – Gefährdungskarte Wasserstand.....	202
A.1.22 Variante 4b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	203
A.1.23 Variante 5a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	204
A.1.24 Variante 5a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	205
A.1.25 Variante 5b – Gefährdungskarte Wasserstand.....	206
A.1.26 Variante 5b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	207
A.1.27 Variante 5c – Gefährdungskarte Wasserstand .....	208
A.1.28 Variante 5c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	209
A.1.29 Variante 6a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	210

A.1.30	Variante 6a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	211
A.1.31	Variante 6b – Gefährdungskarte Wasserstand .....	212
A.1.32	Variante 6b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	213
A.1.33	Variante 7a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	214
A.1.34	Variante 7a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	215
A.1.35	Variante 7b – Gefährdungskarte Wasserstand .....	216
A.1.36	Variante 7b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	217
A.1.37	Variante 7c – Gefährdungskarte Wasserstand .....	218
A.1.38	Variante 7c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	219
A.1.39	Variante 7d – Gefährdungskarte Wasserstand .....	220
A.1.40	Variante 7d – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	221
A.1.41	Variante 7e – Gefährdungskarte Wasserstand .....	222
A.1.42	Variante 7e – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	223
<b>Anhang A 2 Gefährdungskarten Modellgebiet 2 .....</b>		<b>224</b>
A.2.1	Referenzmodell – Gefährdungskarte Wasserstand .....	224
A.2.2	Referenzmodell – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	225
A.2.3	Variante 1a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	226
A.2.4	Variante 1a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	227
A.2.5	Variante 2a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	228
A.2.6	Variante 2a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	229
A.2.7	Variante 2b – Gefährdungskarte Wasserstand .....	230
A.2.8	Variante 2b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	231
A.2.9	Variante 2c – Gefährdungskarte Wasserstand .....	232
A.2.10	Variante 2c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	233
A.2.11	Variante 3a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	234
A.2.12	Variante 3a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	235
A.2.13	Variante 3b – Gefährdungskarte Wasserstand .....	236
A.2.14	Variante 3b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	237
A.2.15	Variante 3c – Gefährdungskarte Wasserstand .....	238
A.2.16	Variante 3c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	239
A.2.17	Variante 3d – Gefährdungskarte Wasserstand .....	240
A.2.18	Variante 3d – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	241
A.2.19	Variante 4a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	242
A.2.20	Variante 4a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	243
A.2.21	Variante 4b – Gefährdungskarte Wasserstand .....	244
A.2.22	Variante 4b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	245
A.2.23	Variante 5a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	246

A.2.24	Variante 5a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	247
A.2.25	Variante 5b – Gefährdungskarte Wasserstand.....	248
A.2.26	Variante 5b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	249
A.2.27	Variante 5c – Gefährdungskarte Wasserstand .....	250
A.2.28	Variante 5c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	251
A.2.29	Variante 6a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	252
A.2.30	Variante 6a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	253
A.2.31	Variante 6b – Gefährdungskarte Wasserstand.....	254
A.2.32	Variante 6b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	255
A.2.33	Variante 7a – Gefährdungskarte Wasserstand .....	256
A.2.34	Variante 7a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	257
A.2.35	Variante 7b – Gefährdungskarte Wasserstand.....	258
A.2.36	Variante 7b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	259
A.2.37	Variante 7c – Gefährdungskarte Wasserstand .....	260
A.2.38	Variante 7c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	261
A.2.39	Variante 7d – Gefährdungskarte Wasserstand .....	262
A.2.40	Variante 7d – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit .....	263
A.2.41	Variante 7e – Gefährdungskarte Wasserstand .....	264
A.2.42	Variante 7e – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit.....	265

# 1 Einleitung

Die Lokalisierung und Bewertung urbaner Gefährdungsbereiche im Kontext überflutungsrelevanter Starkregenereignisse rückt vor dem Hintergrund einer Häufung schadensträchtiger Ereignisse in den letzten Jahren (GDV 2015) in den Fokus von Kommunen und Fachwelt. Die mögliche Zunahme außergewöhnlicher Niederschlagsereignisse im Zusammenhang mit dem Klimawandel bekräftigt diese Entwicklung zusätzlich (IPCC 2012; IPCC 2013; IPCC 2014).

Parallel zu der zunehmenden Brisanz des Problems urbaner Starkregenüberflutungen schreitet die Entwicklung von Werkzeugen zur Gefährdungsanalyse fort. Durch den hohen Anstieg von Rechenleistung, Datenspeicherkapazitäten sowie Datenverarbeitungsmöglichkeiten in den letzten Jahren und der stark zunehmenden Verfügbarkeit überflutungsrelevanter Geodaten, wächst das Rüstzeug zur Identifizierung von Gefährdungslagen, von Bereichen hohen Schadenspotenzials und deren Verschneidung zum Überflutungsrisiko an.

Aufgrund der gleichzeitigen Steigerung des Bedarfs und der verbesserten Möglichkeiten bei der Durchführung von Gefährdungsanalysen zur urbanen Starkregenüberflutung werden selbige bereits auf unterschiedlichste Art und Weise, meist unter Zuhilfenahme von Simulationsmodellen, durchgeführt. In der Regel werden die Ergebnisse der Analysen in einer Karte dargestellt, mittels derer gefährdete Bereiche lokalisiert werden können. Ziele der Gefährdungsanalysen sind neben dem Nachvollzug historischer Ereignisse und Ursachenanalysen, die Informationsbildung für Kommunen und Bürger, die Erstellung von Einsatzplänen für Entwässerungsbetrieb, Feuerwehr und Rettungsdienst auch die Erstellung von Maßnahmenkonzepten und Maßnahmenplanungen.

## 1.1 Veranlassung und Problemstellung

Derzeit existieren unterschiedliche Methoden der Gefährdungsanalyse, die auch im bereits 2016 erschienenen Regelwerk DWA-M 119 beschrieben werden (DWA 2016). Es mangelt jedoch noch an konkreten Empfehlungen oder gar Festlegungen zur anwendungsspezifischen Auswahl und zur Aussagekraft dieser Methoden. Auch innerhalb der Methoden besteht noch Konkretisierungsbedarf z.B. hinsichtlich der erforderlichen Datengrundlagen oder der konkreten Modellkonfiguration. Der Bedarf an Informationen zur Gefährdungslage einerseits und die methodische Unschärfe im Bereich der Gefährdungsanalyse andererseits, führt zur Erzeugung

heterogener Gefährdungskarten. Je nach verwendetem Modellansatz und Detaillierungsgrad, je nach verwendeter Datengrundlage und Darstellungsart und letztlich auch je nach Bearbeiter bzw. Anwender können die Aussagen zur Gefährdungslage stark differieren. Im Vergleich zur konventionellen Kanalnetzberechnung ist eine Kalibrierung oder Validierung aufgrund der unzureichenden Messbarkeit und der Seltenheit von Überflutungsereignissen „im Betrachtungsraum“ oft nur sehr schwer oder gar nicht möglich. Erste vergleichende Untersuchungen mit unterschiedlichen Modellansätzen lassen auf eine nicht zu vernachlässigende Auswirkung der genannten Faktoren auf die Analyseergebnisse schließen (Fuchs & Schmidt 2015a). Diese Umstände führen zu der Annahme, dass bei unterschiedlichen, bisher noch nicht ausreichend festgelegten, Herangehensweisen, auch unterschiedliche Gefährdungsaussagen, je nach Datengrundlage, Modellansatz, Klassifizierungsansatz, Darstellungsart etc. möglich sind. Die Vergleichbarkeit der Analyseergebnisse ist somit nicht garantiert, weshalb der Bedarfsträger (Entscheidungsträger, Bürger, Planer u.a.m.) zurzeit nicht in der Lage ist, die Belastbarkeit der Analyseergebnisse zu bewerten.

In dieser Unsicherheit bezüglich der Vergleichbarkeit der Ergebnisse und Gefährdungsaussagen bei Anwendung unterschiedlicher methodischer Ansätze besteht die Veranlassung für die vorliegende Arbeit.

## 1.2 Zielsetzung und Schwerpunkt der Arbeit

Die Zielsetzung der Arbeit ist es somit, zur Erhöhung der Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus Überflutungssimulationen, welche im Kontext von Analysen zur starkregenbezogenen Überflutungsgefährdung durchgeführt werden, beizutragen. Dazu werden zunächst Einflussgrößen bei der Durchführung entsprechender Simulationen identifiziert sowie ihre Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse und die daraus ableitbaren Gefährdungsaussagen mithilfe von gefährdungsbezogenen Indikatoren quantifiziert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden schließlich gebietspezifische Anwendungsempfehlungen zur Durchführung simulationsgestützter Gefährdungsanalysen abgeleitet.

Die Methoden zur Gefährdungsanalyse sind vielfältig und beruhen größtenteils auf Modellansätzen unterschiedlicher Komplexität und Aussagekraft. Mit zunehmender Komplexität der Modellansätze nehmen sowohl die Aussagekraft zur Überflutungsgefährdung als auch der erforderliche Datenbedarf sowie die erforderliche Rechen- und Speicherkapazität und die Anzahl der möglichen unterschiedlichen Einflussgrößen zu. Die praktikable Methode mit der derzeit höchsten Komplexität beruht auf einem Ansatz, der eine eindimensionale Berechnung des Abflusses im Kanalnetzmodell und eine zweidimensionale Berechnung im Oberflächenmodell mit Abbildung der Kopplung zwischen diesen beiden Teilmodellen beinhaltet (bi-direktional gekoppelte 1D/2D-Abflussberechnung).

Das Phänomen urbaner Starkregenüberflutungen ist aufgrund des Zusammenwirkens von Abflussprozessen auf der Oberfläche, im Entwässerungssystem und an den Schnittstellen hochkomplex. Zur Durchführung einer Gefährdungsanalyse bedarf es daher, aus Sicht des Autors, der Anwendung bi-direktional gekoppelter 1D/2D-Abflussmodelle. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn kleinräumige, objektspezifische Gefährdungsaussagen erforderlich sind, was sich u.a. aus entsprechenden, aktuellen Anpassungen im Regelwerk (DIN EN 752:2017-07) ableiten lässt.

Unter der Annahme eines weiterhin hohen Anstiegs der Rechenleistung, der Datenspeicherkapazität und der Verfügbarkeit überflutungsrelevanter Geodaten, wird sich die Methode der bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung in den nächsten Jahren voraussichtlich weiter durchsetzen, während die weniger komplexen Ansätze an Relevanz verlieren werden.

Aus den dargelegten Gründen liegt der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf der Untersuchung von Einflussgrößen und der Ableitung von Anwendungsempfehlungen innerhalb der Methode der bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung. Die Vergleichbarkeit bei der Anwendung unterschiedlicher Methoden wird innerhalb der Darstellung von theoretischen Grundlagen und Kenntnisstand aufgegriffen.

### **1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit**

Im Rahmen der Darstellung von theoretischen Grundlagen und Kenntnisstand (Kapitel 2) werden, nach einer kurzen begrifflichen Abgrenzung (Kapitel 2.1), zunächst Grundlagen zu Abflussmodellen in der Siedlungsentwässerung dargelegt (Kapitel 2.2). Hierzu werden Modelle zur eindimensionalen Abflussberechnung im Kanalnetz, zur zweidimensionalen Abflussberechnung an der Oberfläche und bi-direktional gekoppelte 1D/2D-Abflussmodelle, die Gegenstand der vorliegenden Untersuchung sind, beschrieben. Theoretische Grundlagen mit direktem Untersuchungsbezug werden vertiefend in Kapitel 3 und Kapitel 4 dargestellt.

Im Anschluss an die allgemeinen Grundlagen zu den Abflussmodellen in der Siedlungsentwässerung wird ein Überblick über Methoden und Modelle gegeben, die im Handlungsfeld der kommunalen Überflutungsvorsorge zur Durchführung von Gefährdungsanalysen eingesetzt werden (Kapitel 2.3).

Mit der nachfolgenden Darlegung von Kenntnisstand und Wissensdefiziten bezüglich der Vergleichbarkeit von Ergebnissen verschiedener Methoden der Gefährdungsanalyse (Kapitel 2.4) werden bisherige Erkenntnisse zur Vergleichbarkeit verschiedener Methoden sowie bisherige Erkenntnisse zu Einflussgrößen innerhalb der Methode der bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung erar-

beitet. Aus dieser Betrachtung wird die Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands auf die Einflussgrößen innerhalb der bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung entwickelt (Kapitel 2.5).

In der folgenden Darstellung der Grundlagen der Untersuchung (Kapitel 3) werden die zwei betrachteten Modellgebiete, die verwendete Datengrundlage sowie die verwendeten hydraulischen Ansätze und Softwarelösungen dargelegt. Das darauffolgende Kapitel 4 beinhaltet die Beschreibung der Untersuchungsmethodik.

Üblicherweise wird ein Simulationsmodell anhand von Messdaten zum realen Systemverhalten kalibriert. Im Bereich der Analysen zur Überflutungsgefährdung bei Starkregen sind solche „Messdaten“ im relevanten Belastungsbereich in der Regel nicht vorhanden. Aus diesem Grund wird eine Untersuchungsmethodik entwickelt, mit deren Hilfe die Auswirkung der Einflussgrößen durch Vergleich verschiedener Modellvarianten mit einem hochdetaillierten, bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Referenzmodell untersucht werden. Die so durchgeführte Sensitivitätsanalyse beinhaltet eigens entwickelte, gefährdungsbezogene Vergleichsindikatoren, welche eine anwendungsbezogene Einschätzung ermöglichen. Das Referenzmodell wird in den beiden betrachteten Modellgebieten erstellt und mithilfe von Daten zu historischen Überflutungsereignissen bestmöglich plausibilisiert. Die Untersuchungsmethodik ist in Kapitel 4 beschrieben.

In Kapitel 5 werden die Durchführung und die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dargestellt. Nach der Erarbeitung der Ergebnisse des Referenzmodells in den beiden Modellgebieten (Kapitel 5.1) werden diese mit den Ergebnissen der Modellvarianten verglichen (Kapitel 5.2). Die so ermittelten gebietsspezifischen Auswirkungen der Einflussgrößen werden im Rahmen einer vergleichenden Betrachtung (Kapitel 5.3) weitergehend bewertet und schließlich als Vorbereitung für die Ableitung von Anwendungsempfehlungen zusammengefasst (Kapitel 5.4). Die abgeleiteten Anwendungsempfehlungen (Kapitel 6) gelten für zukünftig durchgeführte Gefährdungsanalysen auf Basis von bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussmodellen. Abschließend werden die Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick gegeben (Kapitel 7).

## 2 Theoretische Grundlagen und Kenntnisstand

Nach einer begrifflichen Abgrenzung (Kapitel 2.1) folgt eine Zusammenstellung der Grundlagen zu Abflussmodellen in der Siedlungsentwässerung (Kapitel 2.2). In Kapitel 2.3 wird deren Verwendung im Kontext der Analyse von Überflutungsgefährdung beschrieben. Anschließend wird der aktuelle Kenntnisstand zur Vergleichbarkeit sowohl zwischen verschiedenen Methoden der Gefährdungsanalyse als auch zu Einflussgrößen innerhalb der Methode der bi-direktional gekoppelten Abflussberechnung dargelegt (Kapitel 2.4). In Kapitel 2.5 wird auf Basis des Kenntnisstands und der daraus abgeleiteten Wissensdefizite der Gegenstand der vorliegenden Arbeit eingegrenzt.

### 2.1 Begriffliche Abgrenzung: Überflutungsbezogene Gefahr und Gefährdung

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchte Methode zur Überflutungsberechnung wird im Kontext von Analysen zur überflutungsbezogenen Gefahr und Gefährdung als Grundlage einer kommunalen Überflutungsvorsorge verwendet. Die Begriffe Gefahr und Gefährdung werden im allgemeinen Sprachgebrauch unterschiedlich verwendet und sind Bestandteil der Nomenklatur einer Vielzahl von Fachdisziplinen. Aus diesem Grund folgt nachstehend die jeweilige begriffliche Festlegung, wie sie für den Kontext der kommunalen Überflutungsvorsorge in dieser Arbeit gewählt wird. Die Definitionen basieren auf entsprechenden Benennungen im Regelwerk der DWA (DWA 2006; DWA 2016) und des Leitfadens „Schutz kritischer Infrastrukturen – Risiko- und Krisenmanagement“ für Unternehmen und Behörden des Bundesministeriums des Inneren aus dem Jahr 2011 (BMI 2011).

Die Überflutungsgefahr wird definiert als das mögliche Eintreten eines Ereignisses (Wasserstände/Fließgeschwindigkeiten in der Fläche) unabhängig von der örtlichen Überschneidung mit konkreten Schutzgütern.

Die Überflutungsgefährdung wird definiert als das mögliche Eintreten eines Ereignisses einer bestimmten Wiederkehrzeit (Wasserstände/Fließgeschwindigkeiten in der Fläche) mit Bezug zu konkreten Schutzgütern.

Als Schutzgüter werden alle Bereiche und Objekte angesehen, bei denen im Überflutungsfall materielle oder immaterielle Schäden auftreten können. Hierbei kann

es sich z.B. um direkte Schäden an und in Gebäuden oder Infrastrukturanlagen sowie um die, im DWA-Arbeitsblatt 118 (DWA 2006) bei der Definition des Überflutungsbegriffs genannte, Funktionsstörung von Infrastrukturanlagen handeln.

Aufgrund der gewählten Untersuchungsmethodik ist in dieser Arbeit mit „Überflutungsgefährdung“ vorrangig die Gefährdung von Gebäuden infolge relevanter Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten gemeint.

Eine Zusammenstellung aus Definitionen weiterer themabezogener Begrifflichkeiten (z.B. „Überflutung“, „Überstau“, „Starkregen“, „Gefahrenkarte“ etc.) ist dem Merkblatt DWA-M 119 (DWA 2016) zu entnehmen.

## **2.2 Abflussmodelle in der Siedlungsentwässerung**

Im Folgenden werden zunächst allgemeinen Grundlagen zu mathematischen Modellen zur Abbildung von Abflussvorgängen in der Siedlungsentwässerung beschrieben (Kapitel 2.2.1). Darauf folgt die Darstellung von Modellen zur Abflussberechnung im Kanalnetz (Kapitel 2.2.2) sowie zur Abflussberechnung auf der Oberfläche (Kapitel 2.2.3). Abschließend folgt eine kurze allgemeine Erläuterung zu Modellen mit Kopplung zwischen Oberfläche und Kanalnetz (Kapitel 2.2.4). Für die eingehende Beschreibung einzelner Komponenten gekoppelter Modelle wird auf die detaillierten untersuchungsbezogenen Ausführungen in Kapitel 3 und 4 verwiesen.

### **2.2.1 Allgemeine Grundlagen**

Modelle werden in der Siedlungswasserwirtschaft und hier speziell in der Siedlungsentwässerung zumeist zur Beschreibung von Prozessen und Systemen angewendet. In der Siedlungsentwässerung angewendete Modelle lassen sich in physikalische und mathematische Modelle unterteilen. Während für die Beschreibung der Prozesse im Bereich von Systemkomponenten (z.B. Straßenabläufe) sowohl physikalische Modelle als auch mathematische Modelle verwendet werden, kommen bei der Beschreibung der Abflussprozesse im gesamten Entwässerungssystem ausschließlich mathematische Modelle zum Einsatz. Diese lassen sich in Black-Box-Modelle, stochastische Modelle und deterministische Modelle untergliedern (z.B. Wahrheit-Lensing 2010).

Bei Anwendung von Black-Box-Modellen wird nur das äußere Systemverhalten betrachtet. Das innere Systemverhalten wird als Black-Box abgebildet und nicht näher betrachtet. Mithilfe dieses Modelltyps wird die Beziehung zwischen den Eingangsdaten und dem Modelloutput untersucht. Die Kalibrierung erfolgt mit entsprechenden realen Daten.

In stochastischen Modellen werden die zu beschreibenden Prozesse mithilfe von statistischen Zusammenhängen abgebildet. Stochastische Modelle kommen häufig

dann zum Einsatz, wenn die zu beschreibenden Prozesse nicht über deterministische Modelle auf Basis von physikalischen Zusammenhängen abbildbar sind. Die statistischen Zusammenhänge werden wie bei den Black-Box-Modellen aus einer Betrachtung des Systemverhaltens abgeleitet. Da stochastische Modelle wahrheitswahrscheinlichkeitsbasiert sind, können sie bei gleichen Grundlagendaten unterschiedliche Ergebnisse erzeugen.

Die Prozessbeschreibung über deterministische Modelle erfolgt mittels der Darstellung des Systemverhaltens über die entsprechenden physikalischen Zusammenhänge. Das Systemverhalten wird durch die Lösung entsprechender Gleichungssysteme beschrieben. Bei komplexeren Problemstellungen werden die Gleichungssysteme numerisch mithilfe von Computerprogrammen gelöst. Deterministische Modelle in der Siedlungsentwässerung verfügen häufig über diverse Modellparameter. Mithilfe von Messwerten ist durch Anpassung der Modellparameter eine Kalibrierung des jeweiligen Modells möglich.

Für die Prozessbeschreibung im Anwendungsfeld der Siedlungsentwässerung werden die beschriebenen Modelltypen häufig in Kombination verwendet. Die Berechnung des Abflusstransports im Kanalnetz erfolgt hydrodynamisch über deterministische Modelle. Hydrologische Verfahren zur Ermittlung der Abflussbildung und Abflusskonzentration basieren dagegen häufig auf Black-Box-Modellen. Bei dem in dieser Arbeit betrachteten gekoppelten Ansatz wird das hydrodynamisch berechnete Kanalnetzmodell um ein Oberflächenmodell erweitert, in dem der Abfluss an der Oberfläche ebenfalls hydrodynamisch dargestellt wird. Die in diesen beiden Modellen beschriebenen Prozesse werden nachfolgend näher erläutert.

Allgemein basieren die Differentialgleichungen zur Strömungsberechnung auf der Lösung von Bilanzgleichungen der Masse, der Energie und des Impulses. Die Energiebilanz kann bei der Betrachtung von inkompressiblen Fluiden (wie z.B. Wasser) ohne Wärmetransport vernachlässigt werden. Für viele Strömungsbetrachtungen bilden daher die Navier-Stokes-Gleichungen die Grundlage. Diese entstehen aus der Kräftebilanz an einem differentialen Element und beinhalten die drei Transportgleichungen des Impulses in den drei Raumrichtungen. Zusammen mit der Kontinuitätsgleichung stellen die Navier-Stokes-Gleichungen das Gleichungssystem zur Ermittlung von Druck und Geschwindigkeit in den drei Raumrichtungen dar (Aigner & Bollrich 2015).

Zur vollständigen Beschreibung des Gleichungssystems, sowie zur Beschreibung der für die mathematische Berechnung des Abflussvorgangs erforderlichen physikalischen Einschränkungen wird an dieser Stelle auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen (Laurien & Oertel 2009; Price & Vojinovic 2011; Butler & Davies 2011; Aigner & Bollrich 2015).

Bei der Modellierung von Abflussvorgängen ist eine Unterscheidung hinsichtlich des Strömungszustandes erforderlich. Zum einen ist hierbei hinsichtlich der zeitli-

chen Variabilität des Geschwindigkeitsvektors zwischen stationären und instationären Strömungen zu unterscheiden. Zum anderen ist bezüglich der örtlichen Variabilität zwischen gleichförmigen und ungleichförmigen Strömungen zu unterscheiden (Aigner & Bollrich 2015). Wenn keine Veränderung des Geschwindigkeitsvektors über die Zeit und entlang einer Strömungsröhre besteht, handelt es sich um eine stationäre und gleichförmige Strömung. Das Abflussgeschehen an der Oberfläche und im Kanalnetz im Niederschlagsfall ist weitgehend von instationären und ungleichförmigen Strömungsvorgängen geprägt. Mithilfe von hydrodynamischen (deterministischen) Modellansätzen können diese Vorgänge durch Lösen der o.g. Bewegungsgleichungen dargestellt werden.

Der in Modellen abgebildete Abflussvorgang wird nach ATV-DVWK-M 165 (ATV-DVWK 2004) in die nachfolgend erläuterten Teilprozesse Abflussbildung, Abflusskonzentration und Abflusstransport untergliedert.

Die Abflussbildung beschreibt den Vorgang, auf welche Weise der auf eine Fläche fallende Niederschlag in einen Abfluss transformiert wird. Dabei werden Abflussverluste angesetzt, die sich in Anfangsverluste (Benetzungs- und Muldenverluste) sowie in Dauerverluste (Infiltrations- und Verdunstungsverluste) unterteilen lassen (Sieker et al. 2006). Die Abflusskonzentration beschreibt den sich an die Abflussbildung anschließenden Abflussvorgang des Niederschlagsabflusses vom Ort des Entstehens bis hin zum Eintritt in das Kanalnetz, in dem der weitere Abflussvorgang über den Abflusstransport dargestellt ist. Je nach Modellart werden die genannten Prozesse unterschiedlich abgebildet.

In den folgenden Kapiteln wird die Anwendung der beschriebenen Ansätze in Modellen zur Berechnung des Abflusses im Kanalnetz, in Modellen zur Berechnung des Abflusses auf der Oberfläche sowie in gekoppelten Modellen näher beschrieben.

## **2.2.2 Modelle zur Abflussberechnung im Kanalnetz**

Die Abflussberechnung im Kanalnetz erfolgt über sogenannte Kanalnetzmodelle. Kanalnetzmodelle werden zu hydrodynamischen Kanalnetzberechnungen z.B. im Rahmen der Erstellung von Generalentwässerungsplänen und Betrachtungen zum Überstauverhalten eines Entwässerungssystems verwendet. Die Hauptbestandteile eines Kanalnetzmodells sind Schächte, Haltungen, Sonderbauwerke und Teileinzugsgebiete.

Abflussbildung und Abflusskonzentration werden bei konventionellen Kanalnetzmodellen in der Regel über hydrologische Modelle (Black-Box-Modelle) abgebildet. Dabei wird für die im Modell enthaltenen Teileinzugsgebiete über hydrologische Ansätze ein Direktabfluss ermittelt (Abflussbildung) und an die dem jeweiligen Gebiet zugeordnete Haltung übergeben. Bezüglich der Darstellung der Abflusskonzentration existieren teilweise auch deterministische Modellansätze (DHI 2008).

Der Abflusstransport innerhalb des Kanalnetzes wird mit aktuellen Kanalnetzmodellen parallel zu Abflussbildung und -konzentration hydrodynamisch berechnet, da die Fließprozesse hier vergleichsweise komplex sind. Besonders bei der Abbildung von Einstau- und Rückstauvorgängen im Kanalnetz müssen neben Schwerkraft und Rohrreibung auch Druckkräfte und Trägheit berücksichtigt werden (Khelil & Semke 1991). Aufgrund dessen werden hierzu deterministische Modelle mit geringer Vereinfachung der Bewegungsgleichung verwendet. Die dreidimensionalen Bewegungsgleichungen nach Navier-Stokes (siehe Kapitel 2.2.1) werden unter Annahme einer Hauptströmungsrichtung entlang der Rohrleitungen auf die eindimensionalen Saint-Venant-Differenzialgleichungen reduziert (siehe hierzu auch Kapitel 3.3.2). In der Literatur existieren vielfältige Abhandlungen über deren Ableitungen und Möglichkeiten zur Vereinfachung, auf die an dieser Stelle verwiesen wird (Khelil & Semke 1991; Price & Vojinovic 2011; Butler & Davies 2011; Aigner & Bollrich 2015).

Die Anwendung der eindimensionalen Saint-Venant-Differenzialgleichungen setzt eine hydrostatische Druckverteilung, einen konstanten Wasserstand sowie eine konstante Fließgeschwindigkeit über den Fließquerschnitt voraus. Des Weiteren muss eine Inkompressibilität und Homogenität des Fluids sowie ein geringes Energie-, Wasserspiegel- und Sohlgefälle bestehen.

Die hydrostatische Druckverteilung setzt einen Freispiegelabfluss voraus. Bei entsprechender Auslastung des Kanalnetzes kann es jedoch zu einem Anstieg des Wasserspiegels bis zur Scheitelhöhe der Rohrleitungen und damit zu Druckabfluss kommen. Um auch diesen Zustand mit den Saint-Venant-Gleichungen abbilden zu können, bedienen sich heutige Abflussmodelle des sogenannten Preissmann-Slots (Preissmann & Cunge 1961). Hierbei wird im Modell ein Schlitz vom Scheitel des Rohres bis zur Geländeoberkante geführt, so dass bei einem tatsächlich vorherrschenden Druckabfluss in der Modellvorstellung immer noch ein Freispiegelabfluss herrscht und die Saint-Venant-Gleichungen weiterhin angewendet werden können.

Um das Phänomen des Kanalüberstaus, bei dem Wasser aus dem Kanal an die Oberfläche tritt, abzubilden, wird bei eindimensionalen Kanalnetzmodellen ohne Kopplung mit einem Oberflächenmodell ein fiktiver Speicher am überstauenden Schacht angenommen. Übersteigt der berechnete Wasserstand an einem Schachtknoten die Geländeoberkante, wird das Wasser im Modell in dem fiktiven Speicher über dem Knotenpunkt gehalten. Wenn die Überlastung des Kanalnetzes vorüber ist, kann dieses Wasser wieder über den Knotenpunkt dem Kanalnetzmodell zugegeben werden (Innovyze 2013).

Mithilfe von Kanalnetzmodellen lässt sich der Abflussvorgang im Kanalnetz sowohl bei Freispiegelabfluss als auch bei Druckabfluss abbilden. Bei Ereignissen mit ausgeprägtem Kanalüberstau und hohem oberirdischen Abfluss, wie es bei schadenrelevanten Überflutungsereignissen der Fall ist, stößt der Modelansatz jedoch

an seine Grenzen. Informationen zu Gefährdungsbereichen an der Oberfläche können aus den Ergebnissen einer 1D-Kanalnetzrechnung nicht abgeleitet werden.

### 2.2.3 Hydraulische Modelle zur Abflussberechnung auf der Oberfläche

Mithilfe von digitalen Geländemodellen (DGM) lassen sich Oberflächenmodelle zur Berechnung und Darstellung des Abflussvorgangs auf der Oberfläche erzeugen. Digitale Geländemodelle sind numerische, auf ein regelmäßiges Gitter reduzierte Modelle, die die Geländehöhen der Erdoberfläche abbilden. Sie werden aus Geländemesspunkten erzeugt (ADV 2016). Die Datengrundlage zur Erstellung der digitalen Geländemodelle wird meist per Laserscanbefliegung (ALS = Airborne Laserscanning, LIDAR = light detection and ranging) erzeugt (Maas 2005). Die Möglichkeit der Laserscanbefliegung hat u.a. in Deutschland zu einer großflächigen Verfügbarkeit hochauflöser digitaler Geländemodelle geführt. Zur einheitlichen Beschreibung des Reliefs des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland werden im Rahmen des ATKIS®-Projekts durch die deutsche Landesvermessung digitale Geländemodelle unterschiedlicher Qualitätsstufen bereitgestellt (ADV 2016). Im Zuge dessen sind großflächig Modelle mit einer Rasterweite von einem Meter verfügbar. Diese Modelle haben eine Auflösung von mindestens einer Höheninformation pro Quadratmeter.

Als Grundlage für die Berechnung des Oberflächenabflusses werden aus den digitalen Geländemodellen Oberflächenmodelle erzeugt. Am häufigsten kommen bei der Erstellung der Oberflächenmodelle, neben rasterbasierten Methoden, triangulierte Rechennetze zur Anwendung. Diese aus Dreiecken bestehenden Netze werden mithilfe einer Delaunay-Triangulation erzeugt (Delaunay 1934). Grundregel der Delaunay-Triangulationsmethode ist, dass sich innerhalb der Umkreise der drei Eckpunkte der erzeugten Dreiecke keine anderen Punkte der Datengrundlage befinden (Umkreisbedingung). Auf diese Weise werden Dreiecke mit möglichst großen Innenwinkeln, also annähernd gleichseitige Dreiecke erzeugt. Dadurch werden abrupte Größenänderungen zwischen benachbarten Dreiecken verhindert. Diese Kriterien werden für eine möglichst exakte numerische Berechnung vorausgesetzt. Die Triangulation des Oberflächenmodells bietet die Möglichkeit die Auflösung des Oberflächenmodells nach Bedarf in bestimmten Bereichen (automatisiert) anzupassen. Beispielsweise können, durch Vorgabe von Bruchkanten, abflussbeeinflussende Oberflächenstrukturen geschärft werden. Die Oberflächenmodelle in dieser Untersuchung basieren auf Dreiecksnetzen. Weitere Ausführungen zum Thema Triangulation und Abbildung von abflussbeeinflussenden Strukturen sind daher in den untersuchungsbezogenen Erläuterungen in Kapitel 3 und 4 enthalten.

In den letzten Jahren wurden vermehrt Rechennetze auf Rasterbasis untersucht, da diese einen geringeren Aufwand bezüglich der Modellerstellung (Erzeugung des

Oberflächenmodells) erfordern und geringere Rechenzeiten aufweisen. Berechnungen an Rechennetzen auf Rasterbasis bieten außerdem die Möglichkeit mit Prozessoren von Grafikkarten durchgeführt zu werden, was die Rechenzeit weiter verkürzt (Gibson et al. 2016). Als Alternative zu rasterbasierten, quadratischen Rechennetzen wird auch der Einsatz hexagonaler Netze untersucht (De Sousa et al. 2017). Dreiecksnetze bieten aufgrund einer bedarfsorientierten Auflösungsanpassung in Teilbereichen und der Möglichkeit der Implementierung von Oberflächenstrukturen jedoch eine genauere Abbildung der Oberfläche bei gleicher Anzahl an Elementen (Fuchs 2013). Sie sind daher für die kleinräumige Analyse orts- bzw. objektspezifischer Gefährdung von Vorteil.

Im Gegensatz zum Abflussvorgang im Kanalnetz ist die Hauptfließrichtung nicht eindeutig vorgegeben. Aus diesem Grund müssen die Fließvorgänge an der Oberfläche zumindest mit einem zweidimensionalen Ansatz abgebildet werden. In diesem Zusammenhang kommen 2D-Abflussmodelle zur Anwendung, die auf den sogenannten Flachwassergleichungen basieren. Die Flachwassergleichungen stellen die Reduzierung der Navier-Stokes-Gleichungen und der Kontinuitätsgleichung auf ein ebenes Strömungsproblem mit freier Oberfläche dar. Die Geschwindigkeit in vertikaler Richtung wird bei den Flachwassergleichungen vernachlässigt und die horizontale Fließgeschwindigkeit über die Wassertiefe gemittelt. Diese Annahmen begründen sich durch die geringe Wassertiefe im Verhältnis zur horizontalen Ausdehnung. In der Kontinuitätsgleichung werden die Änderung des Volumenstroms in Abhängigkeit vom Weg und die Änderung des Wasserspiegels in Abhängigkeit von der Zeit berücksichtigt (Aigner & Bollrich 2015). Für die Gleichungen und vertiefende Beschreibungen wird auf die Modellbeschreibung in Kapitel 3.3.1 verwiesen.

2D-Oberflächenabflussmodelle besitzen aufgrund ihrer Komplexität eine Vielzahl an Einflussgrößen, die sich, je nach gewähltem Modellansatz, unterschiedlich darstellen und daher die Simulationsergebnisse beeinflussen können. Solche Einflussgrößen sind zum Beispiel die Auflösung des zugrundeliegenden Geländemodells, die Art des Rechennetzes (Raster, Dreieck etc.), die Triangulationsmethode (im Fall eines Dreiecksnetzes), die Abbildung der Oberflächenrauheit, die Art und der Umfang der Implementierung von Oberflächenstrukturen (wie Bordsteinkanten, Gebäudedurchlässe etc.).

#### **2.2.4 Modelle mit Abbildung der Kopplung zwischen Oberfläche und Kanalnetz**

Mit den gezeigten Ansätzen ist eine getrennte Berechnung des Abflussgeschehens im Kanalnetz und an der Oberfläche möglich. In der Realität sind jedoch deutliche Interaktionen zwischen dem unterirdischen und oberirdischen Abfluss zu erwarten und werden dementsprechend häufig beobachtet.

Zur Abbildung dieser Interaktion existieren gekoppelte Modelle, die simultan den oberirdischen und unterirdischen Abfluss berechnen sowie über definierte Kopplungspunkte einen Austausch zwischen den beiden Teilmodellen ermöglichen. Diese sind, wie in Kapitel 1 bereits dargelegt, Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit. In Djordjevic et al. (1999) und Schmitt et al. (2004) ist ein solches Modell beschrieben. Die folgende Abbildung 2-1 zeigt das Prinzip in schematischer Darstellung.

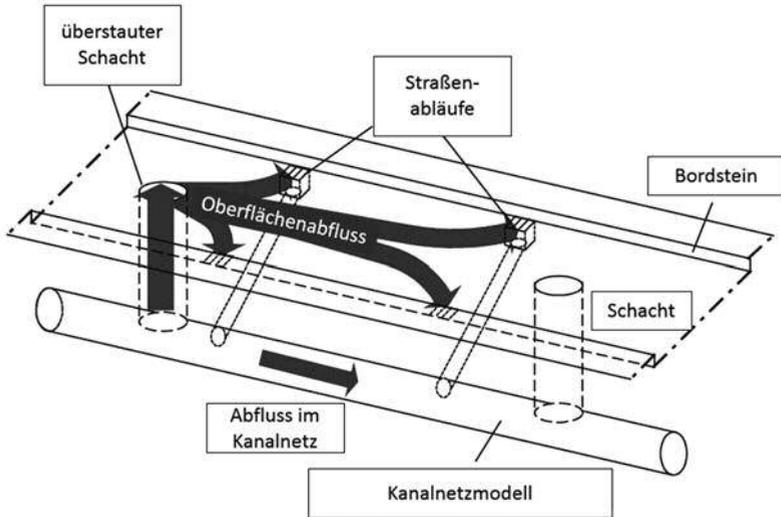


Abbildung 2-1: Interaktion zwischen Kanalnetz- und Oberflächenabfluss (nach Schmitt et al. 2004)

Ist ein Austausch in beide Richtungen (Kanalnetz  $\rightarrow$  Oberfläche bzw. Oberfläche  $\rightarrow$  Kanalnetz) möglich, spricht man von sogenannten bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussmodellen.

Durch die Kopplung der beiden Teilsysteme sind bi-direktional gekoppelte Abflussmodelle geeignet die komplexen Abflussvorgänge im Kanalnetz und an der Oberfläche für den überflutungsrelevanten Starkregenfall abzubilden. Gleichzeitig erhöht sich durch die zunehmende Komplexität die Zahl an Einflussgrößen auf die Simulationsergebnisse. Zu den bereits in Kapitel 2.2.3 genannten Einflussgrößen kommt noch die Art der Abbildung der Kopplungspunkte hinsichtlich ihrer Lage und des entsprechenden hydraulischen Zusammenhangs hinzu.

Des Weiteren sind durch unterschiedliche Ansätze zur Berechnung bzw. der Abflusskonzentration im gekoppelten Modell weitere Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse möglich. Es existieren zum einen Ansätze, die Abflussbildung und Abflusskonzentration hydrologisch, d.h. wie bei der reinen eindimensionalen, hydrodynamischen Kanalnetzrechnung, darstellen (siehe Kapitel 2.2.2). Bei diesen

Ansätzen wird der Niederschlagsabfluss der Teilflächen zunächst dem 1D-Kanalnetzmodell zugegeben. Nur bei Überstau aus dem Kanalnetz wird oberflächiger Abfluss modelliert. Zum anderen existieren Ansätze, bei denen Abflussbildung und Abflusskonzentration direkt im 2D-Oberflächenmodell erfolgt (direkte Berechnung).

Die Möglichkeit der Auswahl unterschiedlicher Modellansätze bzw. Modellkonfigurationen ist auch von der verwendeten Softwarelösung abhängig. Einen Überblick über die verfügbaren Softwarelösungen gibt LANUV NRW (2013).

## **2.3 Methoden und Modelle zur Analyse von Überflutungsgefährdung**

### **2.3.1 Überblick zu Regelwerk und Leitfäden**

#### ***Europäische Norm DIN EN 752***

In der DIN EN 752 „Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden“ wird der Überflutungsschutz als maßgebendes Bewertungskriterium für die hydraulische Leistungsfähigkeit des Entwässerungssystems definiert. Es werden Bemessungsregenhäufigkeiten und Überflutungshäufigkeiten empfohlen, die für Neuplanungen und Sanierungsvorhaben gelten sollen, sofern keine länderspezifischen Anforderungen vorliegen. Wurde der anzustrebende Schutzgrad in der vorherigen Fassung DIN EN 752:2008-04 noch über eine vereinfachte Berücksichtigung des Schadenspotenzials anhand einer Gebietstypisierung durchgeführt, ist durch die Empfehlungen in der aktuellen Fassung DIN EN 752:2017-07 eine kleinräumigere, objektspezifische Festlegung ermöglicht.

#### ***Arbeitsblatt DWA-A 118***

Die Kriterien und Häufigkeitswerte für Bemessungsregen und Überflutungen wurden aus der DIN EN 752:1996 in das Arbeitsblatt DWA-A 118:2006 „Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen“ (DWA 2006) übernommen. Im Arbeitsblatt wird zusätzlich die Überstauhäufigkeit als Kriterium genannt und eine örtliche Überflutungsprüfung bei Überlastung der Kanalisation verlangt. Eine Neuauflage des Arbeitsblatts zur Implementierung der neuen Vorgaben aus der aktuellen Fassung der DIN EN 752:2017-07 steht noch aus.

#### ***Deutsche Industrienorm DIN 1986-100***

DIN 1986-100:2016 „Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke“ führt die für die Grundstücksentwässerung relevanten Punkte aus DIN EN 12056 „Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden“ und DIN EN 752 „Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden“ zusammen.

Im Kontext der Starkregenüberflutung fordert die DIN 1986-100:2016 einen Nachweis der Sicherheit gegen Überflutung für „große Grundstücke“ ( $A_u \geq 800 \text{ m}^2$ ). Hierzu sind dort Vorgaben zur Vorgehensweise und Niederschlagsbelastung enthalten.

### ***Merkblatt DWA-M 119***

Das Merkblatt DWA-M 119 „Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen“ enthält als Ergänzung zu DWA-A 118 weiterführende Empfehlungen zur Bearbeitung der Fragestellung der kommunalen Überflutungsvorsorge. Als Grundlage für die kommunale Überflutungsvorsorge wird die Bewertung von Überflutungsrisiken angesehen. Im Merkblatt sind Methoden zur Analyse von Gefährdung und Schadenspotenzial sowie zur Risikobewertung genannt. Ziel des Merkblattes ist die Unterstützung der Entwicklung einer Bewertungsgrundlage zum Überflutungsrisiko in der Praxis, mit deren Hilfe den Herausforderungen kommunalen Überflutungsvorsorge (Risikokommunikation, Konzeption von Maßnahmen etc.) begegnet werden kann (DWA 2016).

### ***Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg***

Das Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) hat mit dem Leitfaden „Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg“ (LUBW 2016) eine eigene Vorgehensanleitung herausgebracht. Dieser enthält Hintergrundinformationen und Handlungsanleitungen, um das Starkregenrisiko bewerten und entsprechende Maßnahmen zur Reduzierung möglicher Schäden identifizieren zu können. Es bestehen hinsichtlich der Klassifizierung relevanter Starkniederschläge sowie hinsichtlich der Empfehlungen zur Klassifizierung der Überflutungsgefahr Unterschiede zu den Ausführungen in DWA-M 119. Während hinsichtlich der Auswahl der Methode zur Gefährdungsanalyse in DWA-M 119 eine anwendungsspezifische und abgestufte Herangehensweise empfohlen wird, ist im Leitfaden die Methode der 2D-Abflussberechnung an der Oberfläche ohne Kopplung ausgewiesen.

In den letzten Jahren sind zahlreiche weitere Leitfäden und Arbeitshilfen zur Thematik der Überflutungsvorsorge erschienen (DWA 2013; BBSR 2015; DSt 2015; StEB 2016; MKULNV/MBWSV 2016; UBA 2016; DBU 2017a). Im Kontext der hier untersuchten Fragestellung ist der im Oktober 2017 erschienene „Praxisleitfaden zur Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen“ (DBU 2017b) hervorzuheben.

### 2.3.2 Handlungsfeld „Kommunale Überflutungsvorsorge“

Die Vermeidung von Schäden durch Überflutungen infolge seltener und außergewöhnlicher Starkregenereignisse ist sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus technischen Aspekten nicht durch einen ausschließlichen Ausbau des Entwässerungssystems (Vergrößerung von Ableitungs- und Speicherkapazitäten) zu leisten (Schmitt 2011). Ein zielgerichtetes Risikomanagement muss hier an die Stelle eines vollumfänglichen Sicherheitsversprechens treten (Schmitt 2011 in DWA 2016).

Nach DIN EN 752 besteht die Vorgabe einen „als gesellschaftlichen Konsens angemessenen“ Überflutungsschutz sicherzustellen. In diesem Kontext treten Maßnahmen an der Oberfläche zum Rückhalt sowie zur gezielten Ableitung aus dem Handlungsfeld der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung oder auch der temporären Mitbenutzung von Freiflächen verstärkt in den Vordergrund.

Eine obere Belastungsgrenze kann bei überflutungsrelevanten Starkregenereignissen nicht ausgewiesen werden. Dementsprechend kann auch bei Umsetzung entsprechender Maßnahmen ein umfassender und abschließender Überflutungsschutz nicht garantiert werden. Neben der Identifizierung von Gebieten zur Maßnahmenimplementierung muss demnach immer auch eine weitergehende Risikobetrachtung erfolgen, um für den Fall des Versagens des Überflutungsschutzes eine vorsorgende Schadensbegrenzung zu ermöglichen (DWA 2016).

In Abbildung 2-2 sind den in „DWA-M 119“ definierten drei Belastungsbereichen „Bemessungsregen“, „seltene Starkregen“ und „außergewöhnliche Starkregen“ die Anliegen des Überflutungsschutzes und der Überflutungsvorsorge zugeordnet.



Abbildung 2-2: Überflutungsschutz und Überflutungsvorsorge als kommunale Gemeinschaftsaufgabe (DWA 2008)

Sowohl für die Risikobetrachtung als auch für die Verortung von Maßnahmen an der Oberfläche sind Analysen der Überflutungsgefährdung und des Schadenspotenzials an der Oberfläche erforderlich.

Aufgrund der räumlichen Lage von (möglichen) Überflutungsbereichen an der Geländeoberfläche von Siedlungsgebieten erfordert eine verantwortungsvolle Überflutungsvorsorge die Zusammenarbeit der kommunalen Akteure (z.B. Entwässerungsbetrieb, Tiefbauamt, Grünflächenamt, Orts- und Stadtplanungsamt, Straßenbaulastträger u.a.m.). Spätestens bei der vorsorgenden Schadensbegrenzung müssen darüber hinaus auch die Grundstückseigentümer miteinbezogen werden.

Die genannten Gruppen gehören damit alle zu Bedarfsträgern in Bezug auf die Analysen hinsichtlich Gefahr/Gefährdung, Schadenspotenzial und Risiko im Kontext von Starkregenüberflutungen.

### **2.3.3 Analyse von Gefährdung, Schadenspotenzial und Risiko im Kontext von Starkregenüberflutungen**

Hauptbestandteil eines Risikomanagements im Rahmen der kommunalen Überflutungsvorsorge ist neben der Risikokommunikation, der Maßnahmenplanung und der Maßnahmenumsetzung die Identifizierung und Bewertung von Bereichen mit erhöhtem Überflutungsrisiko (Krieger & Schmitt 2015 in DWA 2016). Das Überflutungsrisiko lässt sich durch die überlagerte Betrachtung von Überflutungsgefährdung und anstehendem Schadenspotenzial bewerten (M119).

In dem im Jahr 2016 erschienenen DWA-Merkblatt 119 „Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen“ (DWA 2016) werden Methoden zur Analyse von Überflutungsgefahr/-gefährdung und Schadenspotenzial genannt. Darüber hinaus werden Empfehlungen zur Durchführung von Risikobewertungen gegeben.

Die Risikobewertung basiert dabei auf der Überlagerung von Informationen zur örtlichen Überflutungsgefahr/-gefährdung in Form von Gefahren- bzw. Gefährdungskarten mit Informationen zum örtlichen Schadenspotenzial in Form von Schadenspotenzialkarten. Eine entsprechende überlagerte Darstellung zeigt Abbildung 2-3.



Abbildung 2-3: Beispiel einer Karte (Kartenausschnitt) mit kombinierter Darstellung ereignisbezogener Wasserstände (Überflutungsgefahren) sowie gebäude- und anlagenbezogener Schadenspotenziale (Illgen 2015 in DWA 2016)

Das Regelwerk gibt entsprechende Empfehlungen zur Verschneidung von Gefahr/Gefährdung und Schadenspotenzial zum Überflutungsrisiko.

Risiko		Schadenspotenzial			
		gering	mäßig	hoch	sehr hoch
$T_n = 50 \text{ a}$					
Überflutungsgefahr	gering	gering	gering	mäßig	mäßig
	mäßig	gering	mäßig	mäßig	hoch
	hoch	mäßig	mäßig	hoch	sehr hoch
	sehr hoch	mäßig	hoch	sehr hoch	sehr hoch

Abbildung 2-4: Beispiel zur verbalen Verknüpfung der Bewertungen von Überflutungsgefahr und Schadenspotenzial zum Überflutungsrisiko in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit der Niederschlagsbelastung (nach DWA 2016)

Das als Ergebnis ermittelte Überflutungsrisiko kann dann wiederum in Kartenform dargestellt werden.

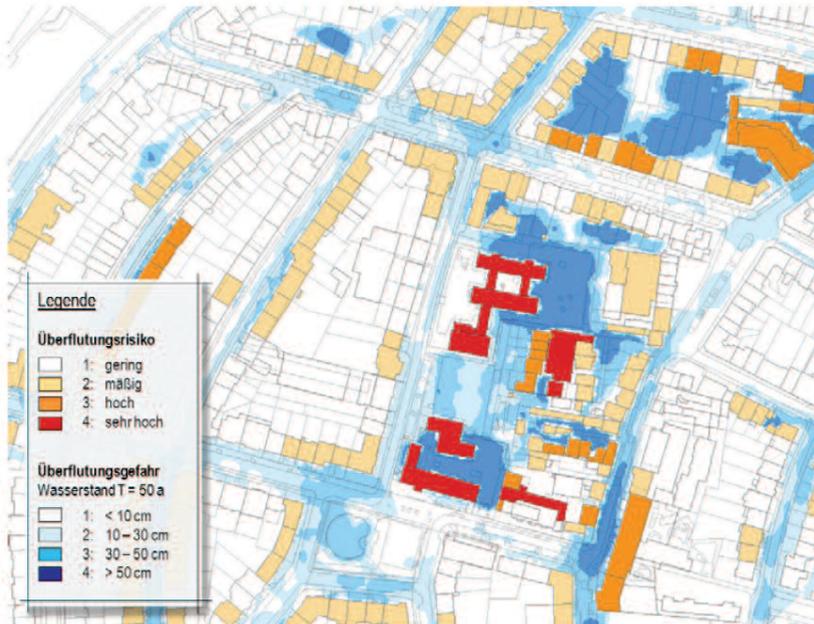


Abbildung 2-5: Ergebnisbeispiel einer systematischen Risikoklassifizierung (Zusammenführung von Gefahren- bzw. Gefährdungs- und Schadenspotenzialklassen zu Risikoklassen) (Illgen 2015 in DWA 2016)

Diese Karten stellen die Grundlage für Risikokommunikation und Maßnahmenplanung dar und sind damit von zentraler Bedeutung für die kommunale Überflutungsvorsorge (siehe auch Behnken et al. 2017).

Die im Fokus dieser Arbeit stehende Sensitivität der Ergebnisse von Gefährdungsanalysen kann dementsprechend einen hohen Einfluss auf den Gesamtprozess des Risikomanagements in der kommunalen Überflutungsvorsorge haben.

### 2.3.4 Methodische Ansätze der Gefährdungsanalyse

Aktuell existiert eine Vielzahl an Methoden zur Durchführung von Gefährdungsanalysen. In der nachstehenden Tabelle sind die wichtigsten Methoden, in vier Kategorien unterteilt, dargestellt.

Tabelle 2-1: Methoden und Arbeitsschritte der Analyse zur Überflutungsgefährdung (verändert nach (Schmitt 2014 bzw. DWA 2016))

<b>Hydraulische Analyse Entwässerungssystem</b>	<b>Topografische Analyse Oberfläche</b>
- Ergebnisse Generalentwässerungsplanung	- Kartenauswertung Topografie, Infrastruktur etc.
- Auswertung Überstauberechnung	- GIS-Analyse Fließwege und Senken
<b>Vereinfachte Überflutungsberechnung</b>	<b>Detaillierte Überflutungsberechnung</b>
- Statische Volumenbetrachtung	- Abflusssimulation der Oberfläche
- Straßenprofilmethode	- Gekoppelte Abflusssimulation von Oberfläche und Kanalnetz

Die Methoden unterscheiden sich u.a. bezüglich der Detaillierung und der Aussagekraft sowie bezüglich der erforderlichen Datengrundlage und dem erforderlichen Aufwand zur Durchführung. Des Weiteren kann zwischen belastungsunabhängigen Methoden und belastungsabhängigen Methoden unterschieden werden (DWA 2016).

Nachfolgend sind die wichtigsten Methoden kurz beschrieben.

### **Hydraulische Analyse**

Im Rahmen der hydraulischen Analyse werden die Ergebnisse einer hydrodynamischen Kanalnetzrechnung (siehe Kapitel 2.2.2) ausgewertet. So können anhand der ausgewiesenen Überstauhäufigkeiten und Überstauvolumina an den Schächten des Entwässerungssystems Rückschlüsse auf möglicherweise überflutungsgefährdete Netzbereiche gezogen werden. Eine Betrachtung des Abflusgeschehens an der Oberfläche ist nicht Teil dieser Analyse. Die hydrodynamische Kanalnetzrechnung basiert auf einer definierten Niederschlagsbelastung. Die hydraulische Analyse gehört somit zu den belastungsabhängigen Methoden.

### **Topografische Analyse**

Als topografische Analyse wird die überflutungsbezogene Auswertung von Planunterlagen zu Topografie, Bebauung und entwässerungsbezogenen Gebietseigenschaften bezeichnet. Einen weitergehenden methodischen Ansatz stellt die Identifizierung und Klassifizierung von Geländesenken und Fließwegen auf Basis eines digitalen Geländemodells mit Geoinformationssystemen (GIS) dar. Die topografische Analyse erfolgt ohne Ansatz einer Niederschlagsbelastung und gehört daher zu den belastungsunabhängigen Methoden.

### **Vereinfachte Überflutungsberechnung**

Zu den Methoden der vereinfachten Überflutungsberechnung gehören nach DWA-M 119 die statische Volumenbetrachtung und die Straßenprofilmethode.

Bei der statischen Volumenbetrachtung handelt es sich um eine Erweiterung der GIS-gestützten topografischen Analyse und somit um eine belastungsabhängige Betrachtung. Den ermittelten Geländesenken werden in Abhängigkeit zu ihren zugehörigen Einzugsgebieten Niederschlagsabflussvolumina charakteristischer Starkregen zugeordnet. Die so ermittelten Wasseransammlungen in den Senkenlagen können dann hinsichtlich ihrer räumlichen Ausdehnung und ihres Wasserstands über Gelände charakterisiert und dargestellt werden.

Bei der Straßenprofilmethode handelt es sich um eine Form der gekoppelten 1D/1D-Abflussberechnung. Das unterirdische Kanalnetzmodell wird hierbei um Gerinneabschnitte entsprechend der oberirdisch verlaufenden Straßen ergänzt. Ihre Aussage ist auf den Straßenraum begrenzt und setzt die Abbildbarkeit der Straßen über entsprechende Gerinneformen voraus.

### **Detaillierte Überflutungsberechnung**

Nach DWA-M 119 zählt zu den Methoden der detaillierten Überflutungsberechnung die 2D-Simulation des Oberflächenabflusses auf Grundlage der „Flachwassergleichungen“ (siehe Kapitel 2.2.3). Ergebnis dieser Methode sind Fließwege, Fließgeschwindigkeiten und Wasserstände über Gelände an der Oberfläche. Der Abflussvorgang und die Belastung oder Entlastung der Oberfläche durch das Kanalnetz kann nicht abgebildet werden.

Als der methodisch umfassendste und aussagekräftigste Ansatz gilt die bi-direktional gekoppelte 1D/2D-Simulation des unterirdischen und oberirdischen Abflusses (siehe Kapitel 2.2.4).

## **2.3.5 Gefährdungsklassifizierung**

Ein wichtiger Aspekt bei der Bewertung und Kommunikation von Überflutungsgefahr, Überflutungsgefährdung, Schadenspotenzial und Risiko ist die jeweilige Klassifizierung. Diese ist notwendig um Schwerpunkte und Prioritäten ableiten zu können. Zur Bewertung der Überflutungsgefahr wird häufig der Wasserstand über Gelände oder auch die Fließgeschwindigkeit oberirdischer Abflusswege herangezogen. Aufgrund der Komplexität des Phänomens Überflutung und der Vielfältigkeit der Schadensarten und Schadensursachen ist eine allgemeingültige Klassifizierung schwierig. Eine gewählte Klassifizierung sollte nur als Orientierung dienen und nicht als allgemeingültig betrachtet werden.

Seit kurzem existieren verschiedene Vorschläge zur Klassifizierung von Überflutungsgefahren auf Basis berechneter Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten.

So ist im DWA-Merkblatt 119 ein Vorschlag zur Festlegung von Gefahrenklassen in Abhängigkeit ermittelter Wasserstände auf der Oberfläche aus Überflutungsberechnungen enthalten.

Tabelle 2-2: Gefahrenklassen in Abhängigkeit ermittelter Wasserstände auf der Oberfläche aus Überflutungsberechnungen (DWA 2016)

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

Auf eine Berücksichtigung von Fließgeschwindigkeiten bei der Gefährdungseinschätzung wird hingewiesen.

Im Leitfaden „Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg“ (LUBW 2016) werden ebenfalls für verschiedene Wasserstandintervalle Gefahren für Leib und Leben, sowie potenzielle Gefahren für Infrastruktur und Objekte beschrieben. Die hier gewählten Klassen weichen von denen aus DWA-M 119 ab. Der Leitfaden beschreibt darüber hinaus Gefahren für verschiedene Intervalle der Fließgeschwindigkeit an der Oberfläche (siehe Tabelle 2-3 und Tabelle 2-4).

Tabelle 2-3: Potenzielle Gefahren für Leib und Leben sowie Infrastruktur und Objekte bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten (nach LUBW 2016)

Fließgeschwindigkeit	Potenzielle Gefahren für Leib und Leben
> 0,2 – 0,5 m/s	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gefahr für ältere, bewegungseingeschränkte Bürger oder Kinder beim Queren des Abflusses</li> </ul>
> 0,5 – 2 m/s	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gefahr für Leib und Leben beim Versuch, sich durch den Abflussstrom zu bewegen</li> </ul>
> 2 m/s	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gefahr für Leib und Leben bei Versagen von Bauwerksteilen</li> <li>▪ Gefahr durch mitgeführte, größere Feststoffe (z. B. Container, Auto, Baumstamm etc.)</li> <li>▪ Versagen von Bauelementen in Folge von Unterspülung</li> </ul>

Tabelle 2-4: Potenzielle Gefahren für Infrastruktur und Objekte bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten (nach LUBW 2016)

Fließgeschwindigkeit	Potenzielle Gefahren für Infrastruktur und Objekte
> 0,2 – 0,5 m/s	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Versagen von Türdichtungen durch erhöhten Druck</li> </ul>
> 0,5 – 2 m/s	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Möglicher Bruch von Wänden durch Kombination von hohen statischen und dynamischen Druckkräften</li> </ul>
> 2 m/s	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mögliches Versagen von Bauwerksteilen durch hohe dynamische Druckkräfte</li> <li>▪ Mögliches Versagen von Bauwerksteilen durch mitgeführte Feststoffe</li> <li>▪ Beschädigung der Bausubstanz durch Unterspülung</li> </ul>

Es ist davon auszugehen, dass bei zukünftig durchgeführten Gefährdungsanalysen Klassifizierungen entsprechend der genannten Empfehlungen durchgeführt werden.

## 2.4 Kenntnisstand und Wissensdefizite bezüglich der Vergleichbarkeit von Ergebnissen verschiedener Methoden der Gefährdungsanalyse

Nachfolgend werden zunächst Ergebnisse aus der Literatur zum Vergleich verschiedener Methoden der Gefährdungsanalyse dargestellt (Kapitel 2.4.1). Die Vergleichsergebnisse sind, dem Detaillierungsgrad der verglichenen Methoden entsprechend, ansteigend bis hin zur bidirektional gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung angeordnet. Daran schließt sich die Darlegung von bereits durchgeführten Untersuchungen zu Einflussgrößen innerhalb der Methode der bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung (Kapitel 2.4.2) an, welche die Grundlage für die Interpretation der eigenen Untersuchungsergebnisse (siehe Kapitel 5) bilden. Abschließend sind bestehende Untersuchungsergebnisse und Empfehlungen zum Ansatz der Niederschlagsbelastung bei der Durchführung von Analysen der Überflutungsgefährdung im Starkregenkontext zusammengefasst (Kapitel 2.4.3).

### 2.4.1 Vergleich verschiedener Methoden der Gefährdungsanalyse

Buchholz et al. (2015) haben eine zweistufige Analyse bestehend aus einer topografischen GIS-Analyse und einer nachgeschalteten 2D-Abflussberechnung unter Zugabe von Überstauvolumina aus einer vorausgegangenen hydrodynamischen 1D-Abflussberechnung (= sequenzielle, mono-direktionale Kopplung) durchgeführt. Nach ihrer Einschätzung liefert die GIS-Analyse erste Erkenntnisse, ersetzt jedoch keine hydrodynamische Berechnung. Der Einfluss des Kanalnetzes auf den Über-

flutungsvorgang ist durch die Integration der Überstauganglinien aus dem Kanalnetzmodell in das 2D-Abflussmodell nach Meinung der Autoren abbildbar. Ein direkter Vergleich mit historischen Daten zum Überflutungsgeschehen oder mit Ergebnissen einer simultanen, bi-direktional gekoppelten Abflussberechnung wurde allerdings nicht durchgeführt.

Paz et al. (2011) haben für mehrere Niederschlagsbelastungen mit unterschiedlicher statistischer Wiederkehrzeit ( $T_n = 2a, 10a, 50a, 100a$ ) Simulationen mit einem sequenziell gekoppelten Abflussmodell durchgeführt. Hierbei wurden die Überstauvolumina aus einer vorausgehenden hydrodynamischen 1D-Abflussberechnung einem 2D-Modell zugegeben (= sequenzielle, mono-direktionale Kopplung). In einem weitergehenden Modellansatz wurde an einem Schacht, mit zentraler Bedeutung für das Überflutungsgeschehen, der Wiedereintritt in das Kanalnetzmodell bei entsprechend vorhandener Kapazität ermöglicht. Der Ergebnisvergleich zwischen dem sequentiellen und mono-direktional gekoppelten Ansatz mit dem simultanen und an einem Schacht bi-direktional gekoppelten Ansatz zeigt große Unterschiede für die Niederschlagsbelastungen mit den statistischen Wiederkehrzeiten 10a, 50a und 100a. Es kommt durch den sequentiellen, mono-direktional gekoppelten Ansatz zu einer starken Überschätzung der maximalen Wasserstände im Vergleich zu dem um einen einzelnen bidirektional gekoppelten Schacht erweiterten Ansatz. Diese Diskrepanz wird sich voraussichtlich bei flächendeckendem Ansatz bi-direktional gekoppelter Schächte noch verstärken. Die Ergebnisse zeigen, dass simultane, bi-direktional gekoppelte Modelle sequentiellen, mono-direktional gekoppelten Modellen vorzuziehen sind.

Jahanbazi und Egger (2014) haben einen Vergleich zwischen einem sequentiellen, mono-direktionalen Kopplungsansatz und einem simultanen, bi-direktionalen Kopplungsansatz durchgeführt. Dabei erzeugte der simultane, bi-direktionale Ansatz deutlich plausiblere Ergebnisse und ermöglichte eine bessere Darstellung des ereignisbezogenen Abflussgeschehens.

Van Dijk et al. (2014) haben in ihren Untersuchungen die Ergebnisse eines 2D-Abflussmodell und eines gekoppelten 1D/2D-Abflussmodell sowie die Erfahrungen von Anwohnern und Betreibern zu historischen Überflutungsbereichen verglichen. Zur Berücksichtigung des Kanalnetzes wurde die Niederschlagsbelastung für die Berechnungen mit dem 2D-Abflussmodell reduziert. Die berechneten maximalen Wasserstände unterscheiden sich zwischen den Modellen vielerorts um mehrere Zentimeter. In einzelnen Bereichen kommt es zu deutlichen Unterschieden von mehreren Dezimetern. An mehreren Stellen zeigt das 2D-Modell Gefährdungslagen an, die im gekoppelten Modell nicht enthalten sind. In diesen Bereichen liegen auch keine entsprechenden Informationen zu vergangenen Überflutungen vor. Umgekehrt werden teilweise Gefährdungslagen mit dem gekoppelten Modell identifiziert, die mit dem 2D-Abflussmodell nicht erkannt werden, jedoch als Problemstellen bekannt sind. Van Dijk et al. (2014) sehen die gekoppelte 1D/2D-Abflussberechnung als die genauere der beiden Methoden an, heben aber die deutlich

höhere Simulationszeit und die für diese Methode erforderliche Datengrundlage hervor. Sie weisen außerdem auf viele weitere Unsicherheiten innerhalb der gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung hin. Als Beispiel wird die von ihnen gewählte ausschließliche Kopplung über die Schächte und die fehlende Modellierung von Straßenabläufen genannt.

Gatke et al. (2015) haben im Rahmen des BMUB-Forschungsprojekts KLAS (FKZ: 03DAS005) eine abgestufte Gefährdungsanalyse durchgeführt. Nach stadtgebietsweiten 2D-Abflussberechnungen auf der Oberfläche wurden in ausgewählten Teilbereichen gekoppelte 1D/2D-Abflusssimulationen durchgeführt. Die Anwendung der gekoppelten 1D/2D-Abflussmodelle mit detaillierter Abbildung der Oberflächenstrukturen führt zu differenzierteren Ergebnissen als die ausschließliche 2D-Abflussberechnung auf der Oberfläche. Die Untersuchungen von Gatke et al. (2015) zeigen weiterhin deutliche Abweichungen bezüglich des berechneten Überstauvolumens bei der Anwendung von hydrodynamischen 1D-Abflussmodellen im Vergleich zum gekoppelten 1D/2D-Ansatz. Aus Sicht von Gatke et al. (2015) lassen sich mit gekoppelten 1D/2D-Abflussmodellen Überflutungsereignisse nachbilden sofern betriebliche und örtliche Besonderheiten berücksichtigt werden. Auch für die Durchführung von Maßnahmenplanungen sollten gekoppelte 1D/2D-Abflussmodelle eingesetzt werden.

Im Rahmen des DBU-Forschungsprojekts KLAS II wurden verschiedene methodische Ansätze zur Abflussberechnung untersucht und in dem im Oktober 2017 erschienenen Praxisleitfaden beschrieben (DBU 2017b). Der durchgeführte Vergleich fand zwischen einer hydrodynamischen, ausschließlich eindimensionalen Kanalnetzberechnung, einer ausschließlichen Berechnung des oberflächigen Abflusses (2D-Berechnung), einer kombinierten Methode, bei der das zuvor berechnete Überstauvolumen ohne Kopplung dem 2D-Oberflächenmodell zugegeben wird und einer bi-direktional gekoppelten Berechnung (1D/2D) statt. Die bi-direktional gekoppelte Berechnung mit flächenspezifischen Abflusskonzentrationsansätzen wird hierbei als diejenige mit der höchsten Aussagekraft und Realitätsnähe ausgewiesen.

Joergensen et al. (2014) haben in ihrer Untersuchung eine große Bandbreite an Methoden der Gefährdungsanalyse miteinander verglichen. Untersucht wurden

- eine einfache topografische Analyse an den DGM-Rohdaten
- eine hydrologisch korrigierte topografische Analyse in der auch falsche, abflussbehindernde Strukturen aus dem Geländemodell entfernt wurden (Brücken etc.)
- eine ausschließliche 2D-Abflussberechnung mit reduzierter Niederschlagsbelastung zur Berücksichtigung der entlastenden Wirkung der Kanalisation
- eine 1D/1D-gekoppelte Abflussberechnung
- eine 1D/2D-gekoppelte Abflussberechnung

Die vergleichende Betrachtung zeigt mitunter erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Ergebnisse der verschiedenen Methoden. Joergensen et al. (2014) ziehen u.a. folgende Schlussfolgerungen:

- Topografische Analysen zeigen die Situation im Worst Case auf.
- 2D-Abflussberechnungen können Überflutungsgefährdungen exakter darstellen als topografische Analysen. Ihre Ergebnisse weisen jedoch teilweise deutliche Unterschiede zu den Ergebnissen komplexerer Methoden auf.
- Gekoppelte 1D/2D-Modelle erzeugen die detailliertesten Ergebnisse.

Joergensen et al. (2014) betonen darüber hinaus eindringlich die Wichtigkeit der Eingangsparameter in Bezug auf mögliche große Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse. Dies gilt insbesondere bei der Verwendung gekoppelter 1D/2D-Abflussmodelle.

Zur Verifizierung der Einschätzungen und zur Untersuchung weiterer Einflussgrößen steht im Folgenden die Untersuchung der Einflussgrößen innerhalb der bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussmodelle im Fokus.

#### **2.4.2 Kenntnisstand zu Einflussgrößen innerhalb der bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung**

##### ***Einfluss der Auflösung des Oberflächenmodells, der Oberflächenrauheit und der Modellierung von Oberflächenstrukturen***

Salvan et al. (2016) haben in Anschluss an eine topografische Voranalyse 2D-Abflussberechnungen durchgeführt und dabei die Auflösung des Geländemodells und die Abbildung von Oberflächenstrukturen (Gebäude, Straßen) variiert. Sie sprechen von einem beträchtlichen Ausmaß der genannten Einflussfaktoren auf die Ergebnisse. Weitergehende Untersuchungen mit gekoppelten 1D/2D-Abflussmodellen sind geplant.

Hsu et al. (2016) haben im Rahmen von 2D-Abflussberechnungen den Einfluss unterschiedlicher DGM-Auflösungen (1x1m, 5x5m, 10x10m, 20x20m, 40x40m) untersucht. Die groben Auflösungen führen zu deutlichen Einschränkungen der Genauigkeit der Simulationsergebnisse. Hsu et al. (2016) empfehlen auf Grundlage der betrachteten Auflösungen den Einsatz möglichst hoher Auflösungen (1x1m). Weitergehende Untersuchungen mit bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Modellen sind geplant.

Gamerith et al. (2017) haben in ihren Untersuchungen zur Abbildung des Abflusssgeschehens von Hangwassereinzugsgebieten im stadtnahen Bereich 2D-Abflussberechnungen auf der Oberfläche durchgeführt. Sie weisen auf die methodische

Überlegenheit der hydrodynamischen Abflussberechnung gegenüber der GIS-basierten topografischen Analyse hin und nennen die Wahl von Ansätzen zur Oberflächenrauheit, insbesondere im Hangbereich, als Herausforderung.

Im bereits erwähnten DBU-Forschungsprojekt KLAS II (DBU 2017b) wurden verschiedene Einflussgrößen innerhalb der gekoppelten Berechnung untersucht. Die Untersuchung wurde qualitativ anhand berechneter Wasserstände ohne Bewertung der Auswirkungen auf die Gefährdungsaussage bewertet. Besonders deutlich wurde hier die mögliche Beeinflussung im Zusammenhang mit der Modellierung von Mauern und Gebäudedurchlässen, die kleinräumig zu großen Unterschieden führen kann.

Shepherd et al. (2011) haben Untersuchungen mit variierenden Auflösungen des Oberflächenmodells, variierenden, pauschalen Ansätzen zur Oberflächenrauheit und variierenden Ansätzen mit und ohne Abbildung von Gebäuden im Modell durchgeführt. Sie ziehen die allgemeine Schlussfolgerung, dass für eine einfache Abschätzung der Überflutungsausdehnung grobe Auflösungen und Ansätze ausreichen. Diese Aussage basiert allerdings auf dem gewählten eher steilen Untersuchungsgebiet. Shepherd et al. (2011) vermuten, dass in flachen Untersuchungsgebieten auch die Auflösung einen deutlichen Einfluss auf die Abschätzung der Überflutungsausdehnung haben kann. Wenn differenzierte Aussagen zu Wasserständen erforderlich sind, empfehlen Shepherd et al. (2011) höhere Auflösungen und eine möglichst realitätsnahe Abbildung von Gebäuden und Oberflächenrauheiten.

### ***Einfluss der Abflusskonzentration***

Fuchs und Schmidt (2015b) haben zwei Ansätze mit bi-direktional gekoppelter Abflussberechnung, aber unterschiedlichen Ansätzen zur Abflusskonzentration (BA1 und BA2) sowie eine ausschließliche 2D-Abflussberechnung (BA3) miteinander verglichen. In Berechnungsansatz 1 (BA1) erfolgt die Abflusskonzentration ausschließlich hydrologisch. Der gesamte Niederschlagsabfluss wird dem 1D-Kanalnetzmodell zugegeben. Es kommt im 2D-Oberflächenmodell nur bei Überstau des Kanalnetzes zu oberflächlichem Abfluss. In Berechnungsansatz 2 (BA2) erfolgt nur auf den Dachflächen eine hydrologische Abflusskonzentration, auf den übrigen Flächen geht der Niederschlagsabfluss direkt in den Abflusstransport im 2D-Oberflächenmodell über. In Berechnungsansatz 3 (BA3) erfolgt die Abflussbildung ausschließlich direkt auf den Elementen des 2D-Oberflächenmodells. Das Kanalnetz wird nur über eine entsprechende Verringerung der Niederschlagsbelastung berücksichtigt. Fuchs und Schmidt (2015b) stellen klare Unterschiede zwischen den Simulationsergebnissen der verschiedenen Berechnungsansätze fest. Berechnungsansatz 1 führt zu deutlich höherem Überstau und dementsprechend deutlich höheren Wasserständen in den Straßenbereichen. Berechnungsansatz 2 scheint nach Fuchs und Schmidt (2015b) dem wirklichen Abflussverhalten am nächsten zu kommen. Nach Fuchs und Schmidt (2015b) ist der flächenhafte Wasserstand und Ab-

fluss auch außerhalb der Straßenflächen für eine sachgerechte Beurteilung der Gefährdung erforderlich. Diesem wird nur mit Berechnungsansatz 2 und 3 ausreichend Rechnung getragen. Berechnungsansatz 3 zeigt ein ähnliches Fließverhalten wie Berechnungsansatz 2, durch die Vernachlässigung des Kanalnetzes werden jedoch gegebenenfalls Überlastungsschwerpunkte nicht erkannt. Nach Meinung von Fuchs und Schmidt (2015b) sind die Abschätzung der Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes und die daraus resultierende Verringerung der Niederschlagsbelastung sehr kritisch zu bewerten.

### ***Einfluss der Modellierung des Kopplungspunkts***

Ein noch weitgehend offenes Feld sind Fragestellungen im Zusammenhang zur Modellierung des Kopplungspunktes. Der am häufigsten gewählte Ansatz ist hier zurzeit noch eine ausschließliche Kopplung über die Schächte des Kanalnetzmodells. Straßenabläufe werden selten modelliert. Zwar existieren Studien zur Leistungsfähigkeit von Straßenabläufen an sich (Russo et al. 2013; Kemper et al. 2016), die Art der Modellierung und der Einfluss ihrer Modellierung auf die Ergebnisse von Überflutungssimulationen und die daraus ableitbaren Gefährdungsaussagen sind weitestgehend nicht untersucht. Die stochastischen Untersuchungen von Leitao et al. (2016) zum Einfluss der Verstopfung von Straßenabläufen auf das Überflutungsgeschehen lassen allgemein große Auswirkungen dieser Modellstellgröße vermuten.

### **2.4.3 Untersuchungen und Empfehlungen zum Ansatz der Niederschlagsbelastung**

Geringe räumliche Ausdehnungen sind bereits bei Starkregen im Bereich der maßgebenden Bemessungs- und Überstauhäufigkeiten für die hydraulische Leistungsfähigkeit der Kanalnetze charakteristisch. Dadurch tritt bei größeren, hydraulisch zusammenhängenden Kanalnetzen in der Regel keine gleichmäßige Überregnung auf. Bei zunehmender Intensität der betrachteten Starkregen, wie es bei überflutungsrelevanten Ereignissen der Fall ist, tritt diese Eigenschaft verstärkt auf (LANUV NRW 2013). Entsprechend stellt sich die Frage wie dieses Phänomen bei der Gefährdungsanalyse im Kontext von Starkregenüberflutungen zu berücksichtigen ist.

Bereits in LUBW (2000) wurden entsprechend vergleichende Betrachtungen mit Niederschlagsansätzen unterschiedlicher räumlicher Verteilung der Intensitäten auf stadtgebietebebene (Karlsruhe) an einem hydrodynamischen 1D-Modell vor dem Hintergrund von Modellkalibrierungen durchgeführt. Gegenübergestellt wurden radargemessene Niederschlagsverteilungen, interpolierte Niederschlagsverteilungen aus Regenschreibermessreihen, gleichmäßige Überregnung mit den Daten eines Schreibers mit hohen Messwerten und gleichmäßige Überregnung mit einem gemittelten Intensitätenverlauf. Die Untersuchungen zeigten

stark unterschiedliche Auslastungsgrade und machten deutlich, dass die Bereiche hoher Niederschlagsintensität allein mittels Radarmessungen erfasst werden. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass noch erheblich längere Messreihen mit Differenzierung der räumlichen Verteilung (Radarmessungen) notwendig sind, um das Niederschlagsgeschehen in seiner tatsächlichen Verteilung über der Fläche annähernd genau beschreiben zu können (siehe auch Thomas et al. (2003) und Schmitt & Thomas (2005).

In Ansätze auf Modellregenbasis können zwar Intensitätsverläufe von Starkregenereignissen mit einbezogen werden, sie enthalten jedoch keine Informationen zur statistischen Verteilung von Zugrichtung, Geschwindigkeit oder Ausdehnung der Niederschlagsfelder. Es existieren zwar bereits seit einiger Zeit Methoden, mit deren Hilfe diese aus Niederschlagsradarmessungen bzw. aus zeitgleichen Aufzeichnungen mehrerer Regenschreiber abgeleitet werden können (Königer & Gnisdorsch 1983; Willems 1998; Vaes et al. 2002; Umakhanthan & Ball 2002). Für die Berücksichtigung räumlich ungleicher Niederschlagsverteilungen bei Modellregen besteht jedoch noch immer kein allgemein anerkanntes Verfahren obwohl schon 2004 in ATV-DVWK-Arbeitsgruppe ES-2.1 (2004) festgestellt. Für die Durchführung von Überstauberechnungen sind nach DWA (2006) unabhängig von der Häufigkeit auch die zeitliche und räumliche Verteilung zu berücksichtigen.

Bei der Verwendung belastungsabhängiger Methoden der Gefährdungsanalyse im starkregeninduzierten Überflutungskontext können nach DWA-Merkblatt 119 (DWA 2016), abweichend von den Empfehlungen zum Überstauachweis nach DWA-Arbeitsblatt 118 (DWA 2006), auch Modellregen mit weniger ausgeprägter zeitlicher Intensitätsverteilung (z.B. als Blockregen) angesetzt werden. Im DWA-Merkblatt 119 wird darüber hinaus eine gleichmäßige Überregnung des betrachteten Einzugsgebiets empfohlen. Dabei wird von einer tendenziellen Überschätzung der Überflutungsgrößen insbesondere bei ausgedehnten Einzugsgebieten ausgegangen, die für die Gefährdungsanalyse als tolerierbar eingeschätzt wird. Weitergehend wird empfohlen die Berechnungen auf Modellregenbasis, sofern verfügbar, durch Berechnungen mit Ansätzen historischer Ereignisse aus Regenschreiberdaten bzw. Radarmessungen zu ergänzen.

## 2.5 Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands

Zur Analyse der Überflutungsgefährdung bei Starkregen existieren derzeit verschiedene Methoden. Diese werden in dem im Jahr 2016 erschienenen DWA-Merkblatt 119 beschrieben und auch bewertet (DWA 2016). Konkrete Anwendungsempfehlungen zur Konfiguration der den Methoden zugrunde liegenden Modelle sind jedoch noch nicht vorhanden. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit Modellsensitivitäten gegenüber definierten Einflussgrößen vergleichend untersucht und Anwendungsempfehlungen abgeleitet.

Aus folgenden Gründen wurde die vorliegende Untersuchung auf die Methode der bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung eingegrenzt.

- Es existiert bereits eine große Zahl an Untersuchungen, die verschiedene Methoden der Gefährdungsanalyse miteinander vergleichen. Deren überwiegende Aussage ist, dass die bi-direktional gekoppelte 1D/2D-Abflussberechnung zu den aussagekräftigsten Ergebnissen führt (siehe Kapitel 2.4.1).
- Die Zunahme von Rechenkapazität, verfügbarer Datengrundlage und Datenauflösung (Abily et al. 2015) lassen eine zukünftig ansteigende Relevanz der Methode im Rahmen von praktischen Anwendungen zur Analyse von Überflutungsgefährdung erwarten.
- Es existieren erst wenige Untersuchungen zu Einflussgrößen innerhalb der bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung. Gleichzeitig wird eine erhöhte Unsicherheit der Methode aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Eingangsparametern und der höheren Methodenkomplexität vermutet (siehe Kapitel 2.4.1 und 2.4.2).

Bisherige vergleichende Betrachtungen basieren vorwiegend auf einfachen (meist ausschließlich qualitativen) Vergleichen von berechneten maximalen Wasserständen. Durch die Verwendung entsprechender (quantitativer) Vergleichsindikatoren wird in dieser Arbeit (u.a.) ein gefährdungsbezogener Vergleich unterschiedlicher Modellkonfigurationen ermöglicht, der über den reinen Vergleich ermittelter maximaler Wasserstände hinausgeht und damit einen höheren Anwendungsbezug sowie aufgrund des quantitativen Ansatzes eine höhere Objektivität als viele bisherige Untersuchungen aufweist.

Des Weiteren sind bisherige Betrachtungen meist nur für einzelne Einflussgrößen durchgeführt worden, wodurch kein Quervergleich hinsichtlich der Sensitivitäten gegenüber den unterschiedlichen Einflussgrößen möglich ist. In der vorliegenden Arbeit werden parallele Betrachtungen unterschiedlicher Einflussgrößen mit gleichbleibenden sonstigen Randbedingungen (Gebiete, Konfigurationen) und Vergleichsindikatoren durchgeführt.

Bestehende Untersuchungen wurden häufig nur an einem Untersuchungsgebiet durchgeführt, was teilweise eine Verallgemeinerung oder gebietsspezifische Aussagen erschwert (siehe Shepherd et al. (2011)).

Bezüglich des Ansatzes der Niederschlagsbelastung sind in dieser Arbeit vergleichende Untersuchungen zur zeitlichen Verteilung der Niederschlagsintensität durchgeführt. Aufgrund der geringen Gebietsgrößen der Untersuchungsgebiete führten Voruntersuchungen bezüglich des Einflusses unterschiedlicher räumlicher Verteilungen der Niederschlagsbelastung zu keinen repräsentativen Ergebnissen und es wurde auf eine weitergehende Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

## 3 Grundlagen der Untersuchung

Im Mittelpunkt der Untersuchung steht die Sensitivitätsanalyse zur Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Modellkonfigurationen auf die Simulationsergebnisse und die konkrete Gefährdungsaussage. In diesem Kapitel werden die Bestandteile der Sensitivitätsanalyse beschrieben. Dazu werden in Kapitel 3.1 zunächst die relevanten Eigenschaften und Kenngrößen der beiden betrachteten Modellgebiete erläutert. Im Anschluss werden die verwendete Datengrundlage (Kapitel 3.2) sowie die verwendete Software und die hydraulischen Berechnungsansätze beschrieben (Kapitel 3.3).

### 3.1 Betrachtete Modellgebiete

Um gebietsspezifische Effekte erfassen und anwendungsspezifische Empfehlungen ableiten zu können wurde die Sensitivitätsanalyse an zwei stark unterschiedlichen Modellgebieten, die beide im Mischsystem entwässert werden, durchgeführt. Die Gebiete unterscheiden sich insbesondere in folgenden Punkten:

- Raumtyp (städtischer Raum ↔ ländlicher Raum)
- Bebauungsstruktur
- Versiegelungsgrad
- Topografie
- Lage des Modellgebiets innerhalb des jeweiligen Kanalnetzeinzugsgebiets

#### 3.1.1 Modellgebiet 1 (flache Topografie, urban)

Modellgebiet 1 zeichnet sich durch eine sehr flache Topografie aus (mittlere Geländeneigung: 0,15%). Es liegt im innerstädtischen Bereich und befindet sich am Ende des ca. 30 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiets eines Abwasserpumpwerks (siehe Abbildung 3-1).

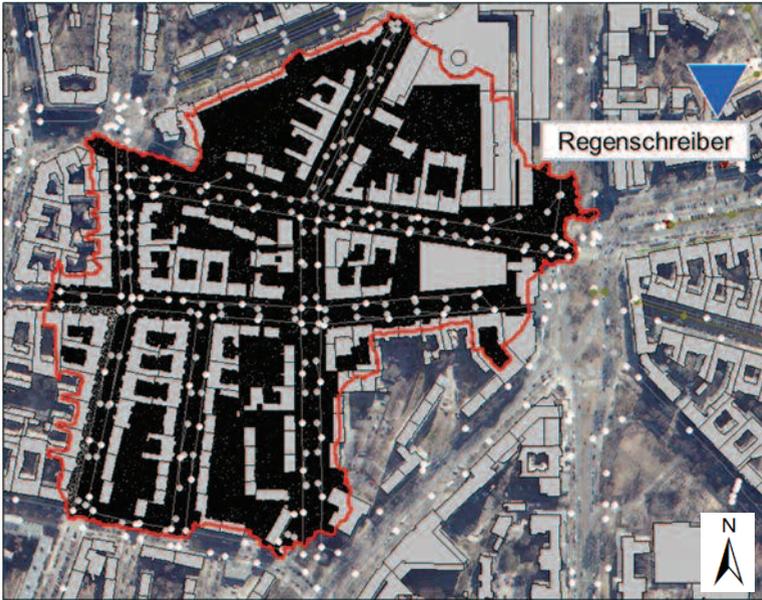


Abbildung 3-1: Lage von Modellgebiet 1 innerhalb des Einzugsgebiets des Abwasserpumpwerks  
Infolge der flachen Topografie und der Lage an diesem abflussbegrenzenden Element besteht eine erhöhte Rückstauproblematik im Starkregenfall. Das Gebiet ist dicht bebaut, die vorherrschende Bebauungsart ist Block- und Blockrandbebauung. Dieser Umstand schlägt sich zum einen in einem hohen Schadenspotential (hohe Bevölkerungsdichte, hohe Dichte von Materialwerten) und zum anderen in einem hohen Anteil der bebauten Fläche (siehe Abbildung 3-2) und damit einer hohen Abflussbereitschaft der Gebietsoberfläche nieder.

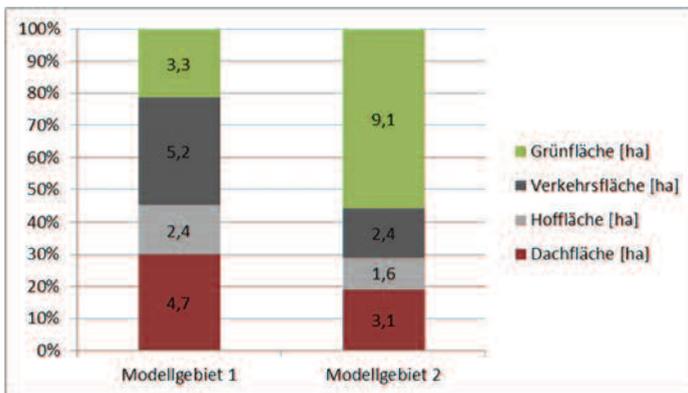


Abbildung 3-2: Modellgebiete 1 und 2 – Flächenanteile nach Grün-, Verkehrs-, Hof- und Dachfläche

Das Gebiet ist in Abbildung 3-3 dargestellt. Die Abgrenzung des Gebiets basiert auf der Generierung einer Wasserscheide anhand des digitalen Geländemodells. Die Fläche des 2D-Oberflächenmodells beträgt 15,5 ha. Im Gebiet existieren 284 Haltungen mit einer Gesamtlänge von 6,7 km. Das Gebiet beinhaltet 96 Schächte und 127 Straßenabläufe. 54 Hofabläufe wurden nachträglich modelliert (siehe Kapitel 4.1). Im Südwesten des Gebiets befindet sich ein tiefliegender Kellereingang (siehe Detailansicht), auf den in der Ergebnisbetrachtung in Kapitel 5 weiter eingegangen wird.



Abbildung 3-3: Modellgebiet 1 mit Darstellung des Geländemodells, der Gebäude und Straßen sowie der Knoten und Haltungen des Kanalnetzmodells.

### 3.1.2 Modellgebiet 2 (bewegte Topografie, ländlich)

Modellgebiet 2 liegt im ländlichen Raum im Bereich einer Talsenke. Die Bebauung befindet sich sowohl im Bereich der Talsenke als auch in Hanglage. Die mittlere

Geländeneigung beträgt 4,6%. Die Straßen verlaufen sowohl parallel als auch senkrecht zum Hang und weisen teilweise deutliche höhere Neigungen auf. Das Gebiet liegt in einem Außenbereich des Entwässerungssystems und wird am nördlichen Rand, im Bereich der Talsenke von einer Bachverrohrung durchkreuzt. Große Teile des Kanalnetzes im Betrachtungsgebiet sind nicht von Rückstau betroffen. Die Talsenke füllt sich im außergewöhnlichen Ereignisfall vorrangig durch oberflächlich zufließendes Wasser aus der Hanglage. Die vorherrschende Bauungsart ist hauptsächlich durch Einzelhausbebauung geprägt. Diese ist teilweise mit Reihenhausbebauung durchsetzt. Oberhalb des bebauten Bereichs befinden sich landwirtschaftliche Nutzflächen sowie ein kleines Waldstück. Diese Flächen bewirken im Starkregenfall Außengebietszuflüsse zum Siedlungsgebiet. Das Gebiet ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Im nördlichen Bereich des Siedlungsgebiets wurde eine Sperrmauer errichtet, die ein oberirdisches Rückhaltebecken in der Talsenke südlich der Landstraße generiert (siehe auch Abbildung 3-5).

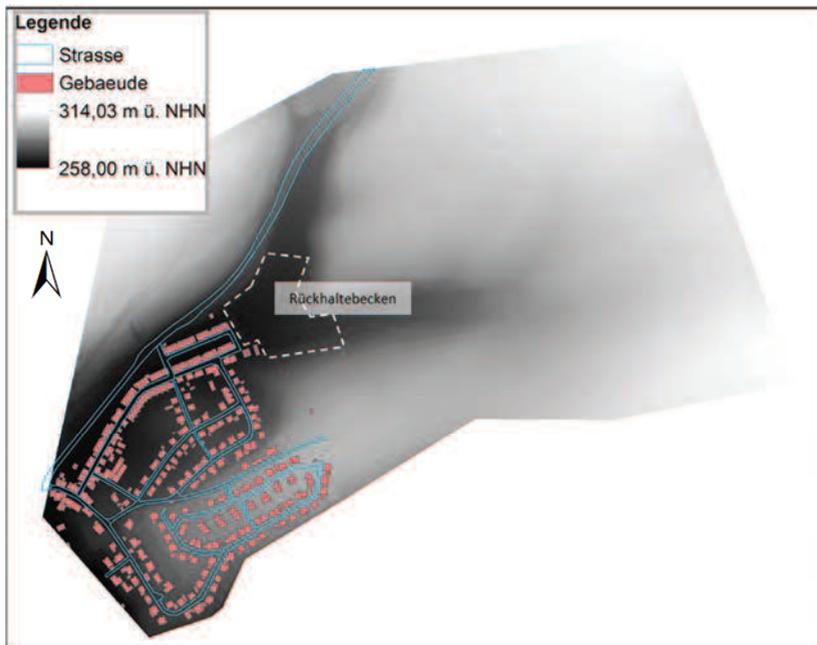


Abbildung 3-4: Modellgebiet 2 mit Darstellung des digitalen Geländemodells, des Außengebiets (Osten) und des Siedlungsgebiets (Südwesten), der Straßen und Gebäude im Siedlungsgebiet sowie der Lage des oberirdischen Rückhaltebeckens.

Die Abgrenzung des Gebiets basiert auf der Generierung einer Wasserscheide anhand des digitalen Geländemodells. Die Fläche des gesamten Einzugsgebiets beträgt 78 ha. Das Siedlungsgebiet ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Die Fläche des

Siedlungsgebiets beträgt 16,2 ha. Es existieren 406 Haltungen mit einer Gesamtlänge von 8,4 km. Das Gebiet beinhaltet 134 Schächte und 128 Straßenabläufe. 135 Hofabläufe wurden nachträglich implementiert. Das oberirdische Rückhaltebecken ist über ein Einlaufbauwerk an eine vom übrigen Kanalnetz getrennte Entwässerungsleitung angeschlossen.

In Abbildung 3-5 sind besondere Bereiche markiert, auf die in der Beschreibung der Ergebnisse in Kapitel 4 näher eingegangen wird. Dazu gehören im Süden des Gebiets das dort befindliche Neubaugebiet und die Talsohle im Westen. Weitere häufig genannte Bereiche sind die westliche Tieflage, der Souterrainbereich sowie die Landstraße im Norden und der Überlaufbereich der Landstraße in Richtung der südlich gelegenen Souterrainwohnungen.

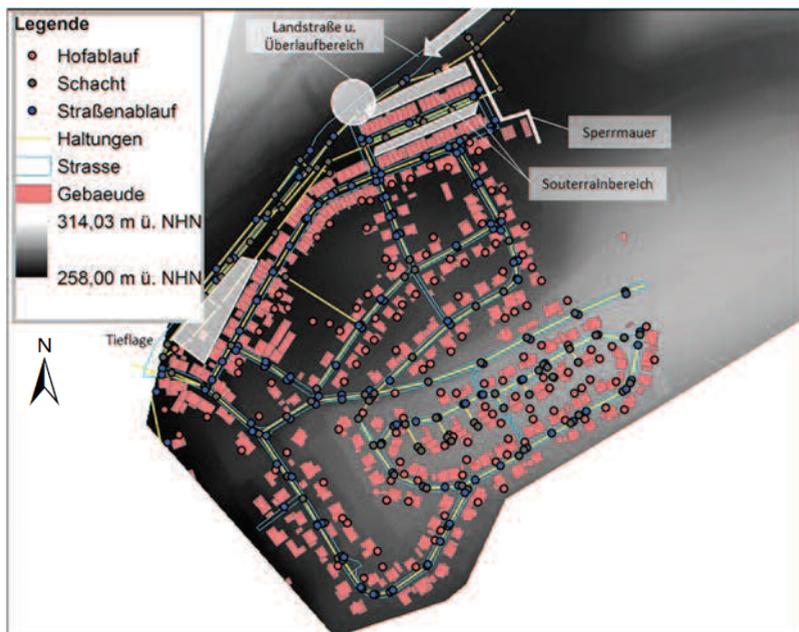


Abbildung 3-5: Siedlungsgebiet von Modellgebiet 2 mit Darstellung des Geländemodells, der Gebäude und Straßen sowie der Knoten und Haltungen des Kanalnetzmodells.

### 3.2 Verwendete Datengrundlage

Nachstehend folgt eine Beschreibung der Datengrundlage, die zur Erstellung des Referenzmodells und der Modellvarianten in den beiden Modellgebieten zur Anwendung kommt.

### 3.2.1 2D-Oberflächenmodell

Die Grundlage für die Erstellung der Oberflächenmodelle bilden digitale Gelände-Modelle aus LiDar-Daten (light detection and ranging). Es handelt sich um ein DGM1 nach den Maßgaben der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (ADV 2016). Die Dichte an Höheninformationen beträgt somit mindestens  $1/m^2$ . Die maximale Höhenungenauigkeit beträgt  $\pm 10$  cm mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95%. Die hier beschriebene Höhenungenauigkeit bezieht sich auf den Vergleich zwischen der gesamten LiDar-Messung und den terrestrischen Messpunkten. Sie ist als Abweichung von den Koordinatensystemdaten anzusehen. Die relativen Höhenungenauigkeiten innerhalb der LiDar-Daten, die dem DGM zugrunde liegen, sind bedeutend geringer und bewegen sich im Millimeterbereich. Auf Grundlage des DGM1 wird für die zweidimensionale Berechnung des oberflächigen Abflusses ein Dreiecksnetz erzeugt. Für eine möglichst fehlerarme numerische Berechnung des Oberflächenabflusses (siehe Kapitel 3.3.1) ist es erforderlich, dass die erzeugten Dreiecke möglichst gleichseitig sind. Weiterhin ist zur Abbildung kleinräumiger Oberflächenstrukturen die Möglichkeit einer lokalen Verdichtung des Oberflächennetzes notwendig. Aus diesem Grund wird eine nach Shewchuk erweiterte Delaunay-Triangulation (Shewchuk 2002) zur Modellierung der Oberfläche angewendet, bei der in den betroffenen Bereichen ein höher aufgelöstes Netz (kleinere Dreiecke) erzeugt wird und durch die in den übrigen Bereichen die Elementgröße einer definierten Maximalgröße entspricht.

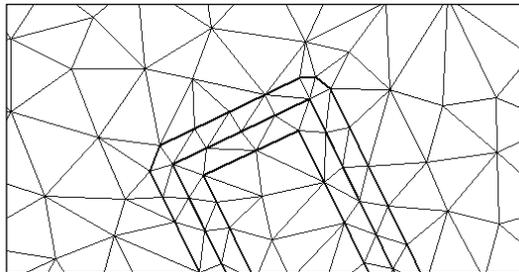


Abbildung 3-6: Ergebnis einer nach Shewchuk erweiterten Delaunay-Triangulation

### 3.2.2 Daten zu abflussbeeinflussenden Oberflächeneigenschaften

Die Daten zu abflussbeeinflussenden Oberflächeneigenschaften lassen sich unterteilen in Daten zu abflussleitenden bzw. abflussbehindernden Oberflächenstrukturen und in Daten zur Modellierung von Abflussbildung und Abflusstransport.

Für die Modellierung genutzte Daten in diesem Kontext sind ALKIS-Daten zu

- Landnutzung/Flächenarten/Versiegelung
- Wasserdurchlässigkeit des Bodens
- Bordkanten, Gebäuden, Mauern, Durchgängen.

Aus diesen Daten wurden für die Modellgebiete teilflächenspezifische Oberflächenrauheiten, Abflussbeiwerte und Infiltrationsansätze abgeleitet. Die abflussbeeinflussenden Oberflächenstrukturen wurden in die aus den digitalen Geländemodellen erzeugten Oberflächenmodelle eingefügt (siehe Kapitel 4.1).

### 3.2.3 1D-Kanalnetzmodell

Als 1D-Kanalnetzmodell steht im Fall von Modellgebiet 1 ein kalibriertes hochaufgelöstes Kanalnetzmodell zur Verfügung. Das Modell beinhaltet die Haltungen und Schächte der vorliegenden Misch- und Trennkanalisation. Straßenabläufe und Hofabläufe sind nicht enthalten. Die Abflussbildung und Abflusskonzentration erfolgt über Teileinzugsgebiete auf Flurstückebene zum häuslichen Schmutzwasseranfall und einzelnen Teilflächen für jede Dach-, Hof-, Grün-, und Verkehrsfläche zur Bildung des Niederschlagsabflusses.

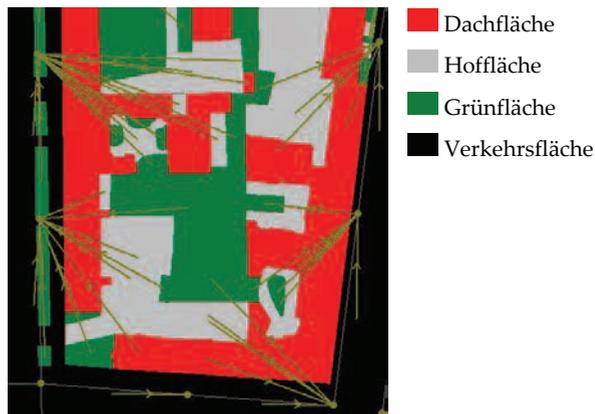


Abbildung 3-7: Feinnetzmodell mit Teileinzugsgebieten unterschiedlicher Flächenart

Das Kanalnetzmodell in Modellgebiet 2 ist aus Bauwerksdaten zum Kanalnetz erzeugt und in die Programmumgebung importiert. Auch hier wurde ein Feinnetzmodell mit Darstellung der einzelnen Haltungen, Schächte und Teileinzugsgebiete auf Flurstückebene erstellt. Eine Differenzierung zwischen Hof- und Grünfläche ist hier jedoch nicht erfolgt.

### 3.2.4 Aufzeichnungen zu historischen Überflutungsereignissen

Für die Modellgebiete existieren Niederschlagsdaten zu überflutungsrelevanten Starkregenereignissen. Aus Dokumentationen ereignisbezogener Feuerwehreinsätze, aus Berichten von Anwohnern und Entwässerungsbetrieben sowie aus überflutungsbezogenem Videomaterial wurden ereignisbezogene Wasserstände abgeschätzt und für die Plausibilisierung der Referenzmodelle georeferenziert. Die Niederschlagsereignisse von Modellgebiet 1 wurden an einem nur 300 Meter entfernten Regenschreiber registriert. Im Kontext überflutungsrelevanter Starkregenereignisse ist eine ortsnahe Erfassung der Niederschläge aufgrund ihrer in der Regel begrenzten lokalen Ausdehnung von hoher Relevanz.

Die Informationen zu Niederschlagsgeschehen und beobachteten Wasserständen aus historischen Überflutungsereignissen wurden für die Plausibilisierung der in dieser Arbeit erstellten Referenzmodelle genutzt (siehe Kapitel 4.2).

### 3.3 Verwendete Software und hydraulische Ansätze

Für die hier durchgeführte Sensitivitätsanalyse wird das Programm InfoWorks CS/2D der Firma Innowyze in der Version 14.0 verwendet. Bei der bi-direktional gekoppelten Simulation erfolgen Abflussberechnungen in den zwei miteinander gekoppelten Systemen (Oberfläche und Kanalnetz) sowie an den Kopplungspunkten. Es bedarf also dreier hydraulischer Ansätze für die Abbildung des Abflussgeschehens. Für diese besteht am Kopplungspunkt im Programm die Möglichkeit, die bereits hinterlegten Ansätze zu verwenden oder über Definition von Wasserstand-Abfluss-Beziehungen eigene Ansätze zu definieren. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird von beiden Möglichkeiten Gebrauch gemacht. Die Ansätze werden nachfolgend beschrieben.

#### 3.3.1 Berechnung des Oberflächenabflusses

##### *Abflusstransport*

Das zu lösende Strömungsproblem auf der Oberfläche im Kontext von Starkregenüberflutungen ist durch eine freie Oberfläche und eine geringe Wassertiefe in Bezug auf die horizontale Ausdehnung charakterisiert. Aus diesem Grund lassen sich für dieses Problem die Navier-Stokes-Gleichungen auf die 2D-Flachwassergleichungen reduzieren. Hierbei wird die Geschwindigkeit in vertikaler Richtung vernachlässigt und die horizontale Geschwindigkeit des Wassers als Mittelwert über die Wassertiefe definiert.

$$\text{Kontinuitätsgleichung: } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

Flachwassergleichung in x-Richtung:

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x^2}{h} + g \cdot \frac{h^2}{2} - h \cdot v_T \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x \cdot q_y}{h} - h \cdot v_T \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + g \cdot h \cdot (I_{Rx} - I_{Sx}) = 0$$

Flachwassergleichung in y-Richtung: (3.2)

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x \cdot q_y}{h} - h \cdot v_T \cdot \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_y^2}{h} + g \cdot \frac{h^2}{2} - h \cdot v_T \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + g \cdot h \cdot (I_{Ry} - I_{Sy}) = 0$$

mit  $q_x = v_x \cdot h$ ,  $q_y = v_y \cdot h$ ,  $v_T = \text{Viskosität}$ ,  $I_R = \text{Reibungsgefälle}$ ,  $I_S = \text{Sohlgefälle}$   
(Aigner & Bollrich 2015)

Die gezeigten Gleichungen sind partielle Differentialgleichungen und müssen für den vorliegenden Anwendungsfall approximativ und numerisch gelöst werden. Zur Lösung wird ein Rechengitter benötigt, das Raum und Zeit näherungsweise in eine endliche Zahl an Teileinheiten untergliedert, also diskretisiert. Im Bereich der partiellen Differentialgleichungen werden vorrangig die folgenden Diskretisierungsansätze verwendet:

- Finite-Elemente-Diskretisierung
- Finite-Differenzen-Diskretisierung
- Finite-Volumen-Diskretisierung

InfoWorks CS/2D verwendet für die Abflussberechnung auf dem Dreiecksnetz der Oberfläche die zweidimensionalen Flachwassergleichungen und für deren Lösung die Finite-Volumen-Diskretisierung.

Die Finite-Volumen-Diskretisierung (FVD) erlaubt aufgrund der großen Toleranz gegenüber hohen Gradienten die Abbildung von Diskontinuitäten im Abflussgeschehen (z.B. schnelle Wechsel zwischen stetigen und schnell variierenden Abflüssen). Sie ist daher für die Anforderungen der Überflutungssimulation sehr geeignet (Innovyze 2013; Rollert et al. 2005).

Die FVD ist konsistent, d.h. der Diskretisierungsfehler nimmt mit Abnahme der Zellengröße ab.

Die FVD setzt allerdings ein „glattes“ Rechengitter voraus, da sonst die Genauigkeit sowie die Konsistenz der Diskretisierung nicht gegeben sind. Dazu müssen die benachbarten Rechenzellen möglichst ähnliche Dimensionen aufweisen. Dies bedeutet für die Dreiecksbildung die Vermeidung spitzwinkliger Dreiecke (Beffa 2017).

Bezüglich der Zeitdiskretisierung handelt es sich bei der FVD um ein explizites Verfahren. Für die Berechnung der Variablen des nächsten Zeitschritts werden bereits bekannte Werte verwendet (Beffa 2017).

Im Gegensatz zu den impliziten Verfahren wird also keine Schätzung mit anschließender Iteration durchgeführt. Der Wahl des Zeitschritts kommt somit besondere

Bedeutung zu, da dieser während der Simulation nicht mehr angepasst werden kann. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde für die Berechnungen ein Zeitschritt von einer Sekunde als ausreichend diskret identifiziert und ausgewählt. Größere Zeitschritte verringern die Rechenzeit, führen jedoch zu mitunter erheblichen Fehlern, die sich in der großen Abweichung der diskreten Gleichung von der Differentialgleichung begründen.

Die Abbildung des Abflusstransportes erfolgt also durch numerische Approximation der 2D-Flachwassergleichungen. Für jedes Oberflächenelement wird unter Berücksichtigung von Gefälle und Oberflächenrauheit, Niederschlag und Verlustansätzen (Abflussbildung) zu jedem Zeitschritt die Änderung des Wasserstandes berechnet.

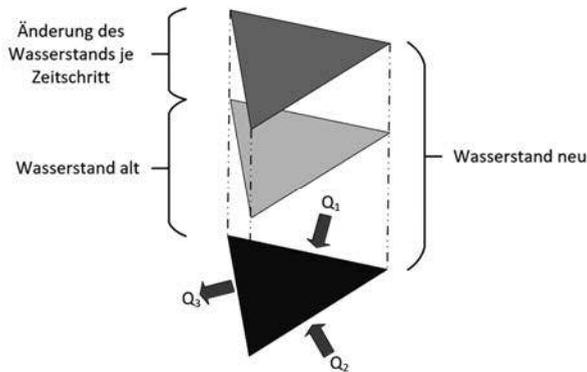


Abbildung 3-8: Wasserstandsänderung pro Zeitschritt für ein Oberflächenelement

Die Oberflächenrauheit kann in InfoWorks CS/2D über die sogenannten „Roughness Polygons“ flächenspezifisch abgebildet werden. Hierbei werden Polygone definiert, denen Oberflächenrauheiten zugeordnet werden können. Den Dreiecken des 2D-Oberflächenmodells wird dann die Rauheit des Polygons zugewiesen, in dessen Umgrenzung sie sich befinden.

### **Abflussbildung**

Die Möglichkeiten zur Abbildung der Abflussbildung im Bereich des 2D-Oberflächenmodells sind in InfoWorks CS/2D im Vergleich zu den Möglichkeiten für die Teileinzugsgebiete des 1D-Kanalnetzmodells stark begrenzt. Die Abflussbildung kann hier nur direkt über das Werkzeug zur Abbildung der Niederschlagsbelastung gesteuert werden. Hier besteht die Möglichkeit neben der Definition von Niederschlagsbelastungen auch konstante Verdunstungsraten zu definieren. Die Möglichkeit direkt Anfangsverluste, Abflussbeiwerte oder Versickerungsraten einzustellen, fehlt. Anfangsverluste und Abflussbeiwerte sind daher über eine direkte

Reduzierung des Niederschlags abgebildet. Versickerungsansätze sind im Modell als Verdunstungsraten realisiert.

InfoWorks CS/2D bietet die Möglichkeit Flächen mit bestimmten Niederschlags- und Verdunstungsprofilen zu definieren. Über diese Möglichkeit ist die flächenspezifische Abbildung unterschiedlicher Anfangsverluste, Abflussbeiwerte oder Versickerungsraten umgesetzt.

### 3.3.2 Berechnung des Abflusses im Kanalnetz

Die Berechnung des Abflusses im Kanalnetz basiert in InfoWorks CS/2D auf der Lösung der Saint-Venant-Gleichungen. Diese bestehen aus der eindimensionalen Bewegungsgleichung in Fließrichtung und der Kontinuitätsgleichung.

$$\text{Kontinuitätsgleichung: } \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (3.3)$$

Bewegungsgleichung in Fließrichtung:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \alpha \cdot \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial s} \cdot \cos \beta + g \cdot A \cdot (I_E - I_S) = 0 \quad (3.4)$$

(Aigner & Bollrich 2015)

Auch hierbei handelt es sich um partielle Differentialgleichungen, die numerisch approximiert werden und die einer Diskretisierung bedürfen. InfoWorks CS/2D verwendet dazu das Preissmann-Verfahren, eine implizite Methode aus dem Bereich der Finiten-Differenzen-Diskretisierung. Das Preissmann-Verfahren erlaubt nicht-äquidistante Netze und berechnet Abfluss und Wasserstand in einem Schritt (Chau 1990). Das implizite Verfahren erlaubt variierende Zeitschritte (Innovyze 2013).

### 3.3.3 Hydraulische Modellierung des Kopplungspunktes (1D/2D)

Die bi-direktionale Kopplung erfolgt bei der 1D/2D-Abflusssimulation über definierte Kopplungspunkte zwischen dem 1D-Kanalnetzmodell und dem 2D-Oberflächenmodell. Die Kopplung erfolgt in der Regel an den Schächten, den Hauptknotenpunkten des Kanalnetzmodells. Sofern digitale Lageinformationen über Straßenabläufe oder Hofabläufe vorliegen, kann die Kopplung auch auf diese Punkte erweitert oder gänzlich auf diese verschoben werden. Neben der Frage nach dem Ort der Kopplung stellt sich auch die Frage nach der Art der hydraulischen Abbildung des Kopplungspunktes. In InfoWorks CS/2D stehen dazu prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Auswahl: Die Abbildung über die Überfallformel bei Eintritt in den Kanal und über die Energieformel bei Austritt aus dem Kanal oder die Abbildung über Abflusskurven mit definierter Beziehung zwischen Abfluss (Q) und Wasserstand (h).

### 3.3.3.1 Abbildung über die Überfallformel bzw. die Energiegleichung

In InfoWorksCS/2D wird zur Berechnung des Wassereintritts in den Kanal die Überfallformel zum Wehrüberfall nach Kindsvater&Carter verwendet (Innovyze 2013), die im Wesentlichen der Überfallformel nach Poleni entspricht (Aigner & Bollrich 2015). Sie unterscheidet sich lediglich aufgrund von kleineren Anpassungen zur Abbildung von Seitenkontraktionen an den Wehrkanten durch Berücksichtigung der effektiven Wehrkante, der Viskosität und der Oberflächenspannung.

Überfallformel nach Kindsvater&Carter:

$$Q = C_e \cdot (b + k_b)(H + k_H)^{3/2} \quad (3.5)$$

mit:  $Q = \text{Abfluss}$ ,  $C_e = \text{Überfallbeiwert}$ ,  $b = \text{Wehrbreite}$ ,  $H = \text{Überfallhöhe}$ ,  $k_b$  und  $k_H = \text{Beiwerte für Viskosität und Oberflächenspannung}$

(Kindsvater & Carter 1957)

An den Knotenpunkten des Kanalnetzmodells lassen sich die Querschnittsfläche im Öffnungsbereich und ein Überfallbeiwert einstellen. Aus der Querschnittsfläche wird unter Annahme eines Kreisprofils die Überfallbreite als Umfang des Kreises angesetzt. Die Menge des eintretenden Wassers an den Kopplungspunkten lässt sich also allein durch die angesetzte Querschnittsfläche und den Überfallbeiwert steuern.

Der Wasseraustritt wird auf Basis der Energiegleichung nach Daniel Bernoulli wie folgt abgebildet:

$$Q = A \cdot \left(2g \cdot \frac{\Delta H}{\zeta_A}\right)^{1/2} \quad (3.6)$$

mit:  $Q = \text{Abfluss}$ ,  $A = \text{Querschnittsfläche}$ ,  $g = \text{Erdbeschleunigung}$ ,

$\Delta H = \text{Energiehöhendifferenz}$ ,  $\zeta_A = \text{Verlustbeiwert Austritt}$

(Aigner & Bollrich 2015)

### 3.3.3.2 Abbildung über definierte Beziehungen zwischen Abfluss und Wasserstand

Der Wassereintritt und Wasseraustritt kann in InfoWorks CS/2D alternativ über die Definition von Beziehungen zwischen Abfluss und Wasserstand (bzw. Energiehöhe) gesteuert werden (Q-H-Beziehungen). Dabei können den unterschiedlichen Knoten unterschiedliche Beziehungen zugeordnet werden.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden über die Abflusskurven abweichende hydraulische Ansätze abgebildet.

Für den Kanaleintritt an den Schächten wird mit diesem Werkzeug im Rahmen der Sensitivitätsanalyse für höhere Wasserstände die Ausflussformel nach Evangelista Torricelli angesetzt.

Ausflussformel nach Torricelli:

$$Q = \mu_A \cdot A \cdot (2g \cdot h)^{1/2} \quad (3.7)$$

mit:  $Q = \text{Ausfluss}$ ,  $\mu_A = \text{Ausflussbeiwert}$ ,  $A = \text{Öffnungsfläche}$ ,

$g = \text{Erdbeschleunigung}$ ,  $h = \text{Energiehöhe}$

(Aigner & Bollrich 2015)

Für die Abbildung des Kanaleintritts an den Straßenabläufen werden für Wasserstände bis 5cm auf der Straße aus den Untersuchungen von (MKULNV NRW 2016) abgeleitete, neigungsabhängige Q-H-Beziehungen angesetzt (siehe „Hydraulische Ansätze an den Kopplungspunkten“ in Kapitel 4.1.6).

Für den Wassereintritt oberhalb 5cm wird die Energieformel siehe Kapitel 3.6 angesetzt.

## 4 Untersuchungsmethodik

Ein Hauptproblem von Modellen zur Überflutungssimulation ist die fehlende Verfügbarkeit von Messdaten. Im Bereich der konventionellen Kanalnetzrechnungsmodelle können in der Regel Messdaten zum Modellinput und zum Modelloutput erhoben werden. Dazu können Abflussmessungen am Ende des Kanalnetzes und ggf. an weiteren relevanten Punkten durchgeführt werden (Output). Messungen von Wasserständen auf der Oberfläche für die in der Regel lokal und zeitlich nur mit kurzer Vorlaufzeit vorhersagbaren Ereignisse sind nicht realisierbar. So muss auf abgeschätzte Wasserstände aus Feuerwehreinsätzen, Medienberichten oder Videomaterial zurückgegriffen werden. Diese sind jedoch in der Regel, wenn überhaupt, nur punktuell vorhanden. Es existieren zwar bereits Arbeiten zu einer automatisierten Erfassung von Wasserständen aus Aufnahmen von Überwachungskameras (Moy de Vitry et al. 2017), diese sind aber noch in der Entwicklung und es wird voraussichtlich noch Jahrzehnte dauern, bis eine entsprechende flächendeckende Datengrundlage aufgebaut werden kann.

Die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Auslenkungen von Einflussgrößen auf die Gefährdungsaussage basiert daher in der vorliegenden Arbeit auf dem Vergleich der Simulationsergebnisse mit denen eines Referenzmodells. Sie wird als lokale Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei der jeweils einzelne Modellparameter ausgelenkt werden, während die übrigen festgehalten werden.

Die Konfiguration des Referenzmodells basiert auf eingehenden Voruntersuchungen. Die Konfiguration ergibt sich unter Berücksichtigung der folgenden Gesichtspunkte:

- Möglichst hohe Realitätsnähe durch detaillierte und differenzierte Ansätze.
- Gewährleistung der Anwendbarkeit des Modellansatzes (allgemein verfügbare Datengrundlage, Datenaufbereitung, Rechenzeit etc.).

Die gewählte Modellkonfiguration für das 1D/2D-Referenzmodell wird im folgenden Kapitel 4.1 beschrieben. In diesem Kapitel werden auch die für die Sensitivitätsanalyse gewählten Niederschlagsbelastungen beschrieben und begründet. Diese bleiben im Rahmen der Sensitivitätsanalyse unverändert.

Die für die beiden betrachteten Modellgebiete aufgestellten Referenzmodelle wurden auf Basis von Informationen zu historischen Überflutungsereignissen bestmöglich plausibilisiert (Kapitel 4.2).

In Kapitel 4.3 werden die Vergleichsindikatoren und in Kapitel 4.4 die Modellvarianten definiert, welche die Basis der Untersuchung (Kapitel 5) darstellen.

## 4.1 Aufbau des Referenzmodells

### 4.1.1 Auflösung des Oberflächenmodells

Das Oberflächenmodell der in dieser Arbeit aufgestellten Referenzmodelle beruht auf einem Dreiecksnetz, das auf Basis eines DGM1 erstellt ist. Das Dreiecksnetz ist mithilfe einer nach Shewchuk erweiterten Delaunay-Triangulation erzeugt (siehe Kapitel 3.2.1). Diese benötigt die Definition folgender Randbedingungen:

- Maximal erlaubte Dreiecksgröße
- Kleinster erlaubter Innenwinkel der Dreiecke

Zur Wahl dieser Randbedingungen wurden die folgenden Überlegungen und die zugehörigen Voruntersuchungen durchgeführt:

Um keinen unnötigen Genauigkeitsverlust zu bewirken sollte die Auflösung des erzeugten Oberflächenmodells die Auflösung der Datengrundlage nicht unterschreiten. Da die Datengrundlage aus einem DGM mit mindestens einer Höheninformation pro Quadratmeter besteht, ist diese Bedingung bei einer maximalen Dreiecksgröße von  $1 \text{ m}^2$  erfüllt. Bei der Reduzierung der maximalen Dreiecksgröße sind folgende Punkte zu beachten:

Eine Reduzierung der maximalen Dreiecksgröße bewirkt zwangsläufig eine Verfeinerung des Dreiecksnetzes und damit eine Erhöhung der Anzahl an Berechnungselementen. Übersteigt diese Anzahl einen gewissen Schwellenwert, kann das Oberflächenmodell nicht mehr in den Simulationsprozess geladen werden, da der Arbeitsspeicher überläuft. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein PC mit 16 Gigabyte RAM verwendet. Der Schwellenwert, ab dem keine Berechnung mehr möglich ist, liegt unter diesen Voraussetzungen bei ca. 350.000 Elementen (Dreiecken). Theoretisch wäre somit in Modellgebiet 1 (15,6 ha) eine Auflösung von 2,2 Elementen pro Quadratmeter möglich. Im Siedlungsgebiet von Modellgebiet 2 (18,8 ha) wären es 1,9 Elemente pro Quadratmeter. Durch den Triangulationsprozess werden aber besonders in Bereichen mit kleinräumigen Strukturvorgaben (z.B. an Häuserecken) sehr viel mehr Dreiecke pro Quadratmeter erzeugt. Infolgedessen ist die Darstellung der theoretisch höchstmöglichen Auflösung flächendeckend nicht zu erreichen.

In Modellgebiet 1 wurden mit der Referenzkonfiguration 189.653 Dreiecke erzeugt was einer mittleren Auflösung von 1,2 Elementen pro Quadratmeter entspricht. Im Siedlungsgebiet von Modellgebiet 2 wurden 266.994 Dreiecke erzeugt was einer mittleren Auflösung von 1,4 Elementen pro Quadratmeter entspricht.

Die Kopplung des 2D-Oberflächenmodells mit dem 1D-Kanalnetzmodells findet in InfoWorks CS/2D ausschließlich über das Oberflächendreieck statt, welches sich direkt über dem 1D-Knoten (Schacht/Straßenablauf) befindet. Zwischen den Straßenablaufknoten und den Bordsteinkanten ist in der Datengrundlage ein unterschiedlich ausgeprägter Abstand, maximal jedoch 0,5 m, vorhanden. Bei einer sehr feinen Auflösung des Oberflächenmodells kann es geschehen, dass der Abfluss am Bordstein „hinter“ dem Oberflächendreieck, welches die Kopplung zum Straßenablaufknoten herstellt, vorbeigeführt wird. Bei einer Dreiecksgröße zwischen 0,2 und 1 m<sup>2</sup> ist dieses Phänomen für die vorliegenden Geoinformationen zur Lage der Straßenabläufe und Bordsteinkanten ausgeschlossen (Höhe im gleichseitigen Dreieck mit 0,2 m<sup>2</sup> Grundfläche: 0,59 m).

Des Weiteren sollte die Fläche der Kopplungsdreiecke die Fläche der Straßenabläufe nicht unterschreiten. Die Tiefe, mit der das Kopplungsdreieck von der Bordsteinkante in die Straße hineinragt, sollte möglichst der realen Breite der Straßenabläufe entsprechen.

Bei der Festlegung des minimalen Innenwinkels der Oberflächendreiecke spielen zwei Aspekte eine Rolle.

Zum einen sollte im Sinne der Abflussberechnung die Erzeugung möglichst gleichseitiger Dreiecke angestrebt werden.

Zum anderen erfordern Oberflächenstrukturen wie Gebäude, Mauern und Bordsteinkanten eine gewisse Flexibilität beim Triangulationsprozess.

Eine erfolgreiche Triangulation in kritischen Bereichen (bspw. zwei eng aneinanderliegende Bruchkanten) kann durch Verkleinerung der Oberflächendreiecke und/oder Anpassung der Innenwinkel der Dreiecke erfolgen. Dabei gilt, je kleiner der erlaubte Innenwinkel, desto größer können die Dreiecke in diesen Bereichen sein. Als sinnvoller Kompromiss in diesem Spannungsfeld wurde im Rahmen von Voruntersuchungen ein minimaler Innenwinkel von 25° ermittelt und festgelegt.

Unter Berücksichtigung dieser Überlegungen und Voruntersuchungen sind die Randbedingungen für die Referenzmodelle wie folgt definiert:

- Maximale Dreiecksgröße: 1 m<sup>2</sup> (geringere Auflösungen führen zu einem Genauigkeitsverlust gegenüber der Datengrundlage, größere Auflösungen führen zu einem Überlaufen des Arbeitsspeichers)
- Kleinster Innenwinkel: 25°

#### **4.1.2 Abbildung von abflussbeeinflussenden Oberflächeneigenschaften**

##### ***Bordsteinkanten***

In InfoWorks CS/2D existieren prinzipiell drei Möglichkeiten Bordsteinkanten im Oberflächenmodell abzubilden:

### *Verzicht auf eine Definition von Bordsteinkanten oder Mauern*

In diesem Ansatz wird vollkommen auf die Güte der zugrunde liegenden Höhen-  
daten vertraut und davon ausgegangen, dass bei einer Triangulation ohne weitere  
Vorgaben eine ausreichende Abbildung des Höhenunterschieds und der Lage der  
Bordsteinkanten erfolgt.

### *Definition als Bruchkanten*

Durch Definition von Bruchkanten in Form von Polylinien wird während des  
Triangulationsprozesses die Lage der Kanten der Dreiecke festgelegt. Es werden  
keine direkten Manipulationen der Höhen-  
daten vorgenommen.

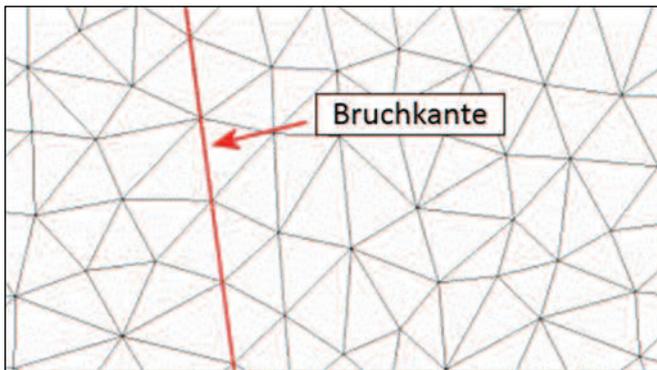


Abbildung 4-1: Bruchkante (Breakline) zur Festlegung der Dreiecks-  
kanten während des Triangulationsprozesses (nach Innovyze 2013)

Mit diesem Instrument kann der Triangulationsprozess so beeinflusst werden, dass  
die Kanten der erzeugten Dreiecke genau an der Bordsteinkante liegen. Der Höhen-  
unterschied an der Bordsteinkante ergibt sich auch hier aus der Datengrund-  
lage.

### *Definition als Mauern*

Durch Definition von Mauern in Form von Polylinien mit Höhenattribut können  
an der Bordsteinkante Bruchkanten definiert werden, die zusätzlich zur Beeinflus-  
sung des Triangulationsprozesses eine Mauer mit definierter Höhe auf das Ober-  
flächenmodell aufsetzen. Diese Methode bewirkt zwar auf jeden Fall eine Abfluss-  
leitung an der Bordsteinkante bis zum Überschreiten des definierten Wasserstan-  
des, kann aber aus zwei Gründen die Modellgüte künstlich negativ beeinflussen.  
Zum einen kann bei hoher Güte der Datengrundlage die Mauer noch zusätzlich auf  
die Bordsteinkante aufgesetzt werden (→ Überhöhung der Bordsteinkante). Zum  
anderen wird der Abfluss nicht nur von der Straße her Richtung Bordstein, sondern  
auch vom Bordstein ausgehend in Richtung Straße behindert.

Für die Erstellung der Referenzmodelle erfolgt die Abbildung der Bordsteinkanten durch Definition von Bruchkanten mit einer Modifikation, die im Folgenden beschrieben und begründet wird.

Zwar scheint die Methode der Abbildung durch Definition einer Bruchkante an der Bordsteinkante am besten geeignet, doch auch bei einer sehr hohen Güte der Datengrundlage ist keine genaue Modellierung der realen Höhenverhältnisse gewährleistet (siehe Abbildung 4-2).

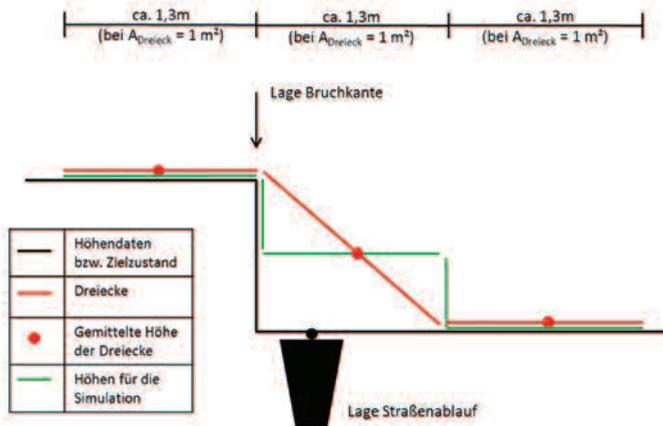


Abbildung 4-2: Schemazeichnung Triangulation im Bordsteinbereich mit einer Bruchkante an der Bordsteinkante (Querschnitt)

Abbildung 4-2 zeigt schematisch den Einfluss der Vorgabe einer Bruchkante an der Bordsteinkante auf den Triangulationsprozess und die resultierenden Höhen für die Abflusssimulation. Problematisch ist, dass die Höhe des Berechnungselements über dem Straßenablauf (Kopplungselement) auf halber Höhe zwischen Straßen- und Bordsteinniveau liegt. Dadurch wird abfließendes Wasser dem Straßenablauf erst zufließen, wenn der Wasserstand dieses Niveau erreicht. Da im Referenzmodell die Kopplung des 1D-Kanalnetzmodells mit dem 2D-Oberflächenmodell auch über die Straßenabläufe erfolgen soll, ist für die Abbildung der Bordsteinkante ein modifizierter Ansatz gewählt (siehe Abbildung 4-3).

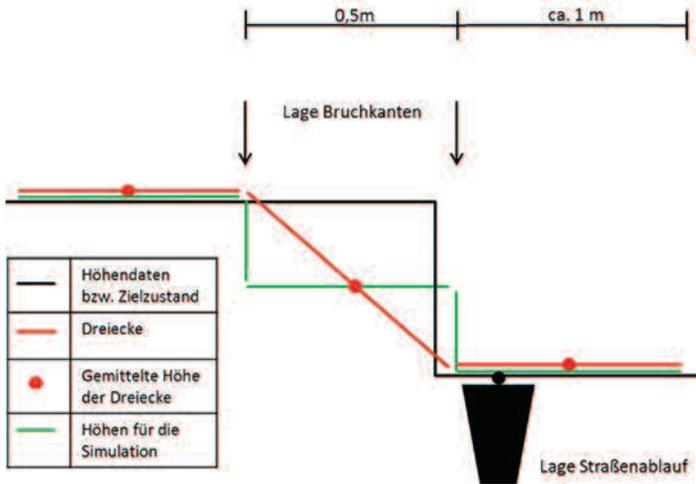


Abbildung 4-3: Schemazeichnung Triangulation im Bordsteinbereich modifizierter Ansatz mit Doppelbruchkante (Querschnitt)

In diesem Ansatz werden zwei parallele Bruchkanten angeordnet. Die innenliegende Bruchkante wird dabei leicht von der Bordsteinkante in Richtung Straßenraum versetzt, um sicherzustellen, dass das Berechnungselement über dem Straßenablauf (Kopplungselement) auf Straßenniveau liegt. Bei der Wahl des Abstandes zwischen den Bruchkanten muss ein Kompromiss eingegangen werden. Je kleiner der Abstand gewählt wird, desto besser nähert sich das Höhenprofil für die Simulation dem realen Zustand bzw. dem Zielzustand an. Dies hat zur Folge, dass auch die erzeugten Dreiecke zwischen den parallelen Bruchkanten kleiner und auch die in unmittelbarer Nähe liegenden Kopplungsdreiecke über dem Straßenablauf kleiner werden. Werden die Kopplungsdreiecke zu klein, ist eine sinnvolle Kopplung nicht mehr möglich, da u.a. der Abfluss am Kopplungspunkt vorbeigeführt wird. Vor diesem Hintergrund ist als Kompromiss ein Abstand von 0,5m zwischen den beiden parallelen Bruchkanten angesetzt.

### **Mauern**

Für Modellgebiet 2 (bewegte Topografie/ländlich) liegen Geoinformationen zu Mauern vor. Diese sind in das Oberflächenmodell mit definierter Höhe implementiert.

### **Durchfahrten**

Modellgebiet 1 (flache Topografie/urban) ist hinsichtlich der Bebauungsstruktur hauptsächlich von Blockbebauung geprägt. Blockbebauung weist naturgemäß häufig Durchfahrten auf, um Straßen und Innenhöfe zu verbinden. Im Referenzmodell

sind die Durchfahrten nachträglich digitalisiert und so ein Abfluss aus dem Innenhof heraus bzw. in den Innenhof hinein ermöglicht. In Modellgebiet 2 (bewegte Topografie/ländlich) liegen keine Durchfahrten vor.

### **Oberflächenrauheit**

Die Oberflächenrauheit hat Einfluss auf den Abflusstransport und kann pauschal über das gesamte Gebiet oder teilflächendifferenziert angesetzt werden. Anhaltspunkte für die Ansatzwahl zur Oberflächenrauheit können z.B. aus Flächennutzungsdaten oder detaillierten Informationen zur Art der Flächenversiegelung abgeleitet werden. Für die Referenzmodelle sind teilflächenspezifische Rauheitsbeiwerte aus diesbezüglichen Flächeninformationen abgeleitet.

Für Modellgebiet 1 (flache Topografie/urban) wurden Rauheitsbeiwerte für die Flächenkategorien Hoffläche, Straßenfläche und Grünfläche festgelegt.

In Modellgebiet 2 (bewegte Topografie/ländlich) ist innerhalb des Siedlungsbereiches eine einheitliche, gemittelte Rauheit von  $n = 0,016$  ( $\hat{=}$  rauer Asphalt) angesetzt. Modellgebiet 2 umfasst neben dem Siedlungsbereich auch Außenbereiche mit unterschiedlicher Nutzung. In den Außenbereichen sind Rauheitsbeiwerte aus den Informationen zur Flächennutzung abgeleitet. Folgende Flächennutzungen sind im Außenbereich von Modellgebiet 2 vorzufinden: Grünland, Ackerland, Gehölz, Streuobstwiesen, Laub- und Nadelwald.

Die flächenspezifischen Rauheitsbeiwerte sind auf Basis von Literaturwerten (Chow 1959), wie in Tabelle 4-1 ersichtlich, angesetzt.

Tabelle 4-1: Flächenspezifische Ansätze zur Oberflächenrauheit für die Referenzmodelle

<b>Flächenart</b>	<b>Manning-Wert (<math>n = 1/k_{st}</math>)</b>	<b>Strickler-Beiwert (<math>k_{st}</math>)</b>
Straße	0,0143	70
Hof	0,0200	50
Grünfläche im urbanen Raum	0,0286	35
Grünland	0,0350	29
Ackerland	0,0200	50
Gehölz	0,0600	17
Streuobstwiese	0,0400	25
Wald (Laub- und Nadelwald)	0,1000	10

### 4.1.3 Abflussbildungsansatz

In InfoWorks CS/2D gibt es keine Möglichkeit im Bereich des 2D-Oberflächenmodells Abflussbildungsansätze (z.B. über Anfangsverluste/Abflussbeiwerte) oder Versickerungsansätze zu hinterlegen. Es besteht lediglich die Möglichkeit lokal differenzierte Niederschlagsprofile mit verknüpften Verdunstungsraten zu definieren. Für die Referenzmodelle sollen jedoch vorrangig Infiltrationsansätze und Abflussbeiwerte definiert werden. Der Effekt von Abflussbeiwerten wird über eine entsprechende Reduzierung der Niederschlagsbelastung abgebildet. Infiltrationsraten werden im Modell als Verdunstungsraten angesetzt.

Generell ist im Bereich von Straßen- und Dachflächen keine Infiltration angesetzt.

Für Modellgebiet 1 (flache Topografie/urban) sind direkt Daten zur Wasserdurchlässigkeit des Bodens und zum Versiegelungsgrad aus dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) übernommen. Diese Daten stehen auf Häuserblockebene zur Verfügung. Aus diesen blockspezifischen Daten zum Versiegelungsgrad sind in Verschneidung mit der Wasserdurchlässigkeit des Bodens blockscharfe Versickerungsansätze für das Referenzmodell definiert, die auf den Hofflächen des Modells angesetzt sind.

Für Modellgebiet 2 (bewegte Topografie/ländlich) stehen keine direkte Angaben zur Wasserdurchlässigkeit des Bodens und zum Versiegelungsgrad zur Verfügung. Aus Flächennutzungsdaten sowie Informationen über Art und Verortung verschiedener Bodenarten ist die Wasserdurchlässigkeit bodenartspezifisch angesetzt und Versickerungsansätze abgeleitet. Für die Außengebiete wurden Abflussbeiwerte aus früheren Untersuchungen übernommen (ITWM 2003).

### 4.1.4 Abflusskonzentration

Bei dem hier verwendeten gekoppelten 1D/2D-Abflussmodell existieren zwei Möglichkeiten Niederschlagsbelastungen aufzubringen.

Zum einen besteht die Möglichkeit der Berechnung über die Teileinzugsgebiete des (konventionellen) 1D-Kanalnetzmodells. Dabei wird der Niederschlagsabfluss von den Teileinzugsgebieten (z.B. einzelne Hof-, Dach-, Straßenflächen) den Knotenpunkten des Kanalnetzmodells (i.d.R. Schächte) übergeben. Bei einer ausschließlichen Berechnung über diese Variante kommt es im 2D-Modell nur zu Abfluss auf der Oberfläche bei vorangegangenem Austritt aus dem 1D-Kanalnetzmodell infolge Rückstau.

Zum anderen besteht die Möglichkeit das 2D-Oberflächenmodell direkt zu berechnen, so dass sich der Niederschlagsabfluss direkt auf der Oberfläche bildet und erst in das Kanalnetz gelangt, wenn er auf einen entsprechenden Kopplungspunkt (Schacht/Straßenablauf) trifft.

Für die Referenzmodelle in beiden Modellgebieten wird ein kombinierter Ansatz gewählt. Dachflächen werden „konventionell“ berechnet, indem der Niederschlagsabfluss auf den (Dachflächen-)Teileinzugsgebieten gebildet und dem nächstgelegenen Knoten (Schacht) zugeordnet wird. Hierdurch wird eine mögliche Überlastung der Dachentwässerung im Starkregenfall vernachlässigt. Alle übrigen Flächen (Straßen-, Hof-, Grün- und Außengebietsflächen) werden direkt im 2D-Oberflächenmodell berechnet.

#### **4.1.5 Niederschlagsbelastung**

##### ***Niederschlagsbelastung – statistische Wiederkehrzeit***

Als Niederschlagsbelastung werden Modellregen auf Grundlage der KOSTRA-Datenbank angesetzt (KOSTRA-DWD-2010 2010). Die statistische Wiederkehrzeit der ausgewählten Niederschlagsbelastungen beträgt 50 Jahre. Sie ist damit der Kategorie der „außergewöhnlichen Starkregenereignisse“ nach dem DWA-Merkblatt 119 (DWA 2016) zuzuordnen. Die historischen Ereignisse, welche in den beiden Modellgebieten zur Plausibilisierung des Referenzmodells herangezogen sind, sind ebenfalls der Kategorie „außergewöhnliche Starkregenereignisse“ zuzuordnen.

##### ***Niederschlagsbelastung – räumliche Verteilung***

Es wird eine räumlich gleichmäßige Überregnung der Modellgebiete unterstellt. Zu diesem Ansatz führt eine Voruntersuchung anhand der URBAS-Datenbank (BMBF 2008). Hier sind die Durchmesser von 8 relevanten Niederschlagsereignissen mit einer statistischen Wiederkehrzeit von mindestens 50 Jahren ermittelt. Hieraus lässt sich eine Mindestgröße des Kerns der Starkregenzelle von 4 km feststellen. Diese Flächengröße führt zu einer räumlich gleichmäßigen Überregnung des gesamten hydrologischen Einzugsgebiets und des Einzugsgebiets des Kanalnetzes von Modellgebiet 2 (bewegte Topografie/ländlich). In Modellgebiet 1 (flache Topografie/urban) wird ebenfalls das hydrologische Einzugsgebiet komplett überregnet. Das Einzugsgebiet des Kanalnetzmodells ist zwar mit einem Durchmesser von vier Kilometern größer als die angesetzte Regenzelle, eine vergleichende Betrachtung mit Überregnung des gesamten Einzugsgebiets des Abwasserpumpwerks (30 km<sup>2</sup>) ergibt jedoch keine nennenswerten Unterschiede hinsichtlich der Simulationsergebnisse zum Überflutungsgeschehen.

##### ***Niederschlagsbelastung – zeitliche Verteilung***

Neben der Wahl eines Ansatzes zur räumlichen Verteilung der Niederschlagsbelastung stellt sich die Frage nach der zeitlichen Verteilung der Niederschlagsintensitäten. Relevante Verteilungsansätze in diesem Kontext sind verschiedene Modellregentypen (Blockregen, Eulerregen) sowie historische Niederschlagsverteilungen.

In einer Voruntersuchung (Heck 2017) wurden die folgenden Niederschlagsansätze hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die wasserstandbezogene Gefährdungsaussage verglichen:

- Konstanter Blockregen
- Euler-Modellregen Typ I
- Euler-Modellregen Typ II
- Historisches Starkregenereignis

Für die unterschiedlichen Niederschlagsansätze wurde jeweils die Niederschlagshöhe eines Ereignisses der statistischen Wiederkehrzeit 50a mit Dauer 60 Minuten nach (KOSTRA-DWD-2010 2010) angesetzt. Auch der historische Starkregen weist für die genannte Dauerstufe eine statistische Wiederkehrzeit von ungefähr 50 Jahren auf. Die Betrachtung wurde an Modellgebiet 1 durchgeführt. Die Sensitivitätsbetrachtung wurde im Rahmen der Voruntersuchung auf Basis des Summenindicators zur wasserstandbedingten Überflutungsgefährdung (siehe Kapitel 4.3) durchgeführt.

Die Untersuchung ergab bezogen auf den Ansatz eines konstanten Blockregens die folgenden relativen Abweichungen:

Tabelle 4-2: Veränderung des Summenindicators zur wasserstandbedingten Überflutungsgefährdung durch verschiedene Niederschlagsansätze

Niederschlagsansatz	Veränderung Summenindikator Gefährdung gegenüber Blockregenansatz
Konstante Intensität	-
Euler Typ I	$\pm 0\%$
Euler Typ II	+ 9%
Historische Verteilung eines 50-jährlichen Ereignisses	+ 7%

Der Ansatz eines Modellregens nach Euler Typ I bewirkt gegenüber dem Blockregenansatz keine Veränderung des Indicators. Die beiden übrigen Ansätze haben einen Anstieg des Indicators zur Folge. Dabei bewirkt der Ansatz eines Modellregens nach Euler Typ II die stärkere Zunahme des Indikatorwerts. Um eine Unterschätzung der Gefährdung zu vermeiden wird auf Grundlage dieser Untersuchung eine Verteilung der Niederschlagsintensitäten, für kleinräumige Betrachtungen, nach Euler Typ II empfohlen. Entsprechend wurde im Rahmen der vorliegenden Sensitivitätsanalyse die Niederschlagsbelastung in Form eines Modellregens nach Euler Typ II aufgebracht.

### **Niederschlagsbelastung – Auswahl der Dauerstufe**

Zur Ermittlung der jeweils relevanten Dauerstufe der Niederschlagsbelastung sind die beiden (Referenz-)Modellgebiete mit Modellregen variierender Dauerstufe beaufschlagt. Konstant bleibt dabei die statistische Wiederkehrzeit (50 a) und die zeitliche Intensitätsverteilung (Euler Typ II) sowie aus Rechenzeitgründen die simulierte Zeit (240 min). Es sind die Dauerstufen 15 min, 30 min, 60 min, 120 min und 240 min untersucht. Aus dieser Ansatzwahl ergeben sich die folgenden Niederschlagsbelastungen.

Für die Entscheidung, welche Dauerstufe maßgebend ist, gelten die folgenden Bewertungsindikatoren:

- Volumenbilanzen über die gesamte Simulationszeit zu Niederschlagsabfluss, Versickerung, Eintritt in das Kanalnetz (2D→1D), oberirdischer Abfluss aus dem 2D-Gebiet heraus, Wasser auf der Oberfläche am Ende der Simulation und Austritt von Wasser an die Oberfläche (1D→2D)
- Maximale Wasserstände klassifiziert nach DWA-M 119 (siehe Kapitel 4.3)
- Klassifizierung der Gebäudegefährdung nach DWA-M 119 (siehe Kapitel 4.3)

Als Ergebnis dieser Voruntersuchung ist für Modellgebiet 1 (flache Topografie/urban) die Dauerstufe 240 Minuten maßgebend. Für Modellgebiet 2 (bewegte Topografie/ländlich) ist die Dauerstufe 120 Minuten maßgebend.

Ausschlaggebend für die Maßgeblichkeit der Dauerstufe ist im Fall von **Modellgebiet 1** die Fließzeit im Kanalnetz. Aufgrund der Lage des betrachteten Ausschnitts am Ende des Gesamteinzugsgebiets des Abwasserpumpwerks ergibt sich die **hohe Dauerstufe von 240 Minuten**. Die Bewertungsindikatoren liegen allerdings im Vergleich zur Dauerstufe 120 Minuten nur minimal höher.

Für **Modellgebiet 2** ergibt sich die, relativ zur Größe des bebauten und kanalisiert Gebiets, hohe **Dauerstufe (120 Minuten)** aus der Fließzeit auf der Oberfläche (Außengebietszuflüsse) sowie der Drosselwirkung des oberirdischen Rückhaltebeckens.

Zusammenfassung zum Ansatz der Niederschlagsbelastung:

Modellgebiet 1: Eulermodellregen Typ II mit  $T_n=50$  a und  $D = 240$  min

Modellgebiet 2: Eulermodellregen Typ II mit  $T_n=50$  a und  $D = 120$  min

#### **4.1.6 Kopplung zwischen 1D- und 2D-Abflussmodell**

##### **Verwendete Kopplungspunkte und Kenndaten**

Im Referenzmodell werden neben den Schächten auch die Straßenabläufe abgebildet. Die Lage der Straßenabläufe ist aus der Datengrundlage entnommen. Auf den Flurstücken sind im Rahmen der Arbeit Hofabläufe lagemäßig angenommen und

in das Modell eingepflegt. Es existiert jedoch keine Datengrundlage zu Lage und Art der Hofabläufe. Die Hofabläufe sind im Modell an den jeweils tiefsten Punkten der Flurstücke verortet. Je Flurstück ist ein Hofablauf angesetzt und an das Kanalnetzmodell angeschlossen. Die Bauwerksabmessungen und hydraulischen Kopplungsansätze werden für die Hofabläufe analog zu den Straßenabläufen angesetzt.

Für die Schächte ist pauschal die vorrangig vorliegende Schachtabdeckung nach DIN 19584 Klasse D400 angesetzt. Für die Straßenabläufe ist ein Pultauflsatz 500x500 Klasse D 400 angesetzt. Dieser Aufsatz wurde bei den physikalischen Versuchen in MKULNV (NRW 2016) verwendet. Da im Referenzmodell die aus MKULNV NRW (2016) abgeleiteten Q-H-Beziehungen angesetzt sind, ist der in diesen Versuchen verwendete Aufsatz für die beiden Modellgebiete unterstellt, auch wenn dieser in der Realität nicht flächendeckend vorliegt.

Die nachfolgenden Tabellen beinhalten die Kenndaten der Kopplungspunkte (Schächte/Straßenabläufe/Hofabläufe).

Tabelle 4-3: Kenndaten zum Kopplungspunkt Schacht

<b>Kenndaten des Kopplungspunkts „Schacht“</b>	
Bezeichnung Schachtabdeckung	DIN 19584 D400
Lichter Durchmesser	605 mm
Lichte Fläche → SPA	0,29 m <sup>2</sup>
Umfang Schacht	1,90 m
Gewicht	185 kg
Gewichtskraft	1814,9 N
Andruckfläche Wasseraustritt	0,27 m <sup>2</sup>
Anzahl Lüftungslöcher	16
Radius Lüftungslöcher	2 cm
Summierte Wehrbreite aller Lüftungslöcher (=Summe der Umfänge)	2,01 m
Einlaufquerschnitt aller Lüftungslöcher	0,02 m <sup>2</sup>
Erforderlicher Druck zum Herausheben des Schachtdeckels	0,7 mWS

Tabelle 4-4: Kenndaten zum Kopplungspunkt Straßenablauf/Hofablauf

<b>Kenndaten des Kopplungspunkts „Straßenablauf/Hofablauf“</b>	
Bezeichnung Aufsatz	500x500 D 400
Lichter Durchmesser	0,44 m
Lichte Fläche	0,16 m <sup>2</sup>
Einlaufquerschnitt aller Einlaufschlitze	0,104 m <sup>2</sup>

### **Hydraulische Ansätze an den Kopplungspunkten**

Die hydraulischen Ansätze werden über die Definition und Zuordnung von Abflusskurven abgebildet. Für den hydraulischen Zusammenhang des Wassereintritts (2D1D) am Straßenablauf bzw. Hofablauf werden bis zu einem Wasserstand von 5 cm neigungsabhängige Q-H-Beziehungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse aus MKULNV NRW (2016) angesetzt. In MKULNV NRW (2016) wurde die Effizienz der Straßenabläufe sowohl in Bezug auf den gesamten Abfluss auf der Straße im Bereich des Straßenablaufs („mit Vorbeifluss“) als auch ausschließlich in Bezug auf den Abfluss über den Straßenablauf hinweg („ohne Vorbeifluss“) ermittelt. Da die Auflösung des Oberflächenmodells im Bereich der Straßenabläufe so gewählt wurde, dass die Kopplungsdreiecke der Breite des Straßenablaufs entsprechen, wurden die Q-H-Beziehungen aus den Ergebnissen zur Effizienz „ohne Vorbeifluss“ abgeleitet.

Da diese nur für Wasserstände zwischen 1,2 cm bis 3,3 cm vorliegen, ist der hydraulische Zusammenhang entsprechend extrapoliert. Die unterschiedlichen neigungsabhängigen hydraulischen Ansätze sind den Straßenabläufen je nach Straßenlängsneigung zugeordnet. In MKULNV NRW (2016) wurde der hydraulische Zusammenhang für vier verschiedene Längsneigungen bestimmt (2,5%, 5%, 7,5%, 10%). Die Straßenabläufe sind entsprechend der jeweiligen Straßenlängsneigung einer der vier Zusammenhänge zugeordnet. Im Referenzmodell ist ab 5 cm Wasserstand eine vollständige Überdeckung des Straßenablaufaufsatzes mit Wasser unterstellt. In Konsequenz ist ab diesem Wasserstand der hydraulische Zusammenhang auf Basis der Energiegleichung nach Daniel Bernoulli angesetzt (siehe Kapitel 3.3.3).

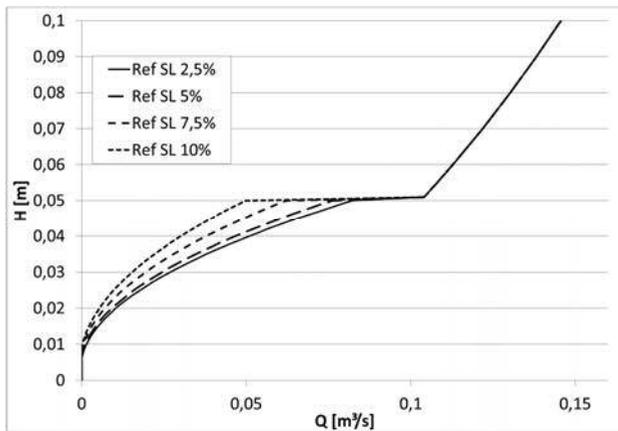


Abbildung 4-4: Q-H-Beziehung an den Straßenabläufen im Referenzmodell - Kanaleintritt

Bei den Hofabläufen ist der gleiche Ansatz gewählt, nur dass hier einheitlich die Q-H-Beziehung für das niedrigste Gefälle nach MKULNV NRW (2016) zugewiesen ist.

Der Wasseraustritt (1D→2D) an den Straßen- und Hofabläufen ist über die Energiegleichung auf Basis des Einlaufquerschnitts (siehe Tabelle 4-4) abgebildet.

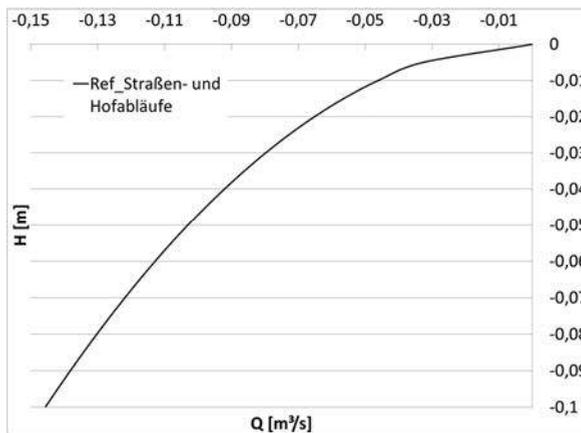


Abbildung 4-5: Q-H-Beziehung an den Straßenabläufen im Referenzmodell - Kanalaustritt

An den Schächten wird der Wassereintritt zunächst bis zu einem Wasserstand von ca. 2cm auf Basis der Überfallformel dargestellt. Die Wehrbreite ergibt sich dabei aus dem summierten Umfang der 16 Lüftungslöcher à 2cm Radius. Ab Wasserstand 2cm wird dann die Ausflussformel (siehe Kapitel 3.3.3) auf Basis des Einlaufquerschnitts der 16 Lüftungslöcher (siehe Tabelle 4-3) angesetzt.

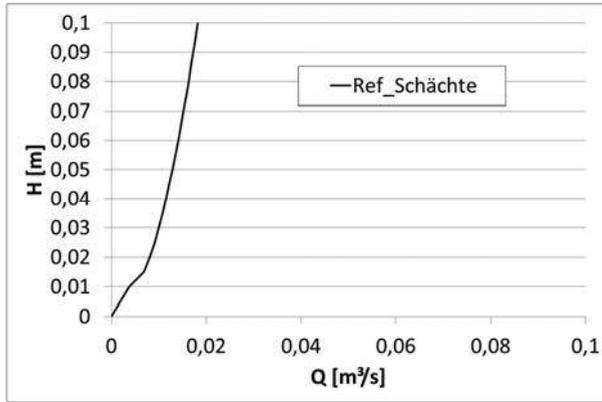


Abbildung 4-6: Q-H-Beziehung an den Schächten im Referenzmodell -Kanal Eintritt

Beim Wasseraustritt wird ab einem Druck von 0,7mWS unterstellt, dass der Schachtdeckel sich aus seiner Verankerung löst. Dieser Schwellwert errechnet sich aus der Andruckfläche und der Gewichtskraft der Schachtabdeckung. Generell wird der hydraulische Zusammenhang über die Energiegleichung beschrieben. Bis zum Herausheben des Schachtdeckels wird der Öffnungsquerschnitt der Lüftungslöcher angesetzt, danach der des offenen Schachtes (siehe Tabelle 4-3).

Die Q-H-Beziehung der Schächte und der Straßen- und Hofabläufe ist zusammenfassend in Abbildung 4-7 dargestellt. Bei den Straßenabläufen ist hier nur der Zusammenhang für ein Längsgefälle von 2,5% dargestellt.

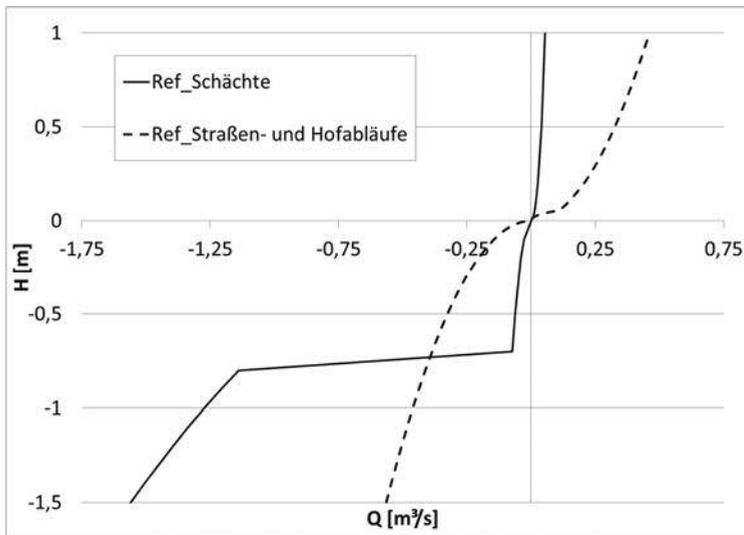


Abbildung 4-7: Q-H-Beziehung an Schächten und Straßen-/Hofabläufen im Referenzmodell

Im Referenzmodell ist keine Maximalbegrenzung der Ein- und Austrittskapazität hinterlegt. Eine Maximalbegrenzung wird im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersucht.

## 4.2 Plausibilisierung des Referenzmodells

Eine Validierung oder gar Kalibrierung von Modellen zur Überflutungssimulation ist in vergleichbarer Form zur Kalibrierung von Kanalnetzmodellen im Bereich der Bemessungsregen aufgrund fehlender entsprechender Messdaten nicht möglich.

Dennoch wurde in beiden Modellgebieten der Versuch einer Plausibilisierung der Ergebnisse des Referenzmodells unternommen.

Zur Plausibilisierung des Referenzmodells in Modellgebiet 1 lagen Dokumentationen eines Feuerwehreinsatzes sowie Videomaterial von Anwohnern zu einem starkregeninduzierten Überflutungsereignis vor.

Aus diesen Informationen ist die Wasserspiegellage in einer Straße im Bereich des Tiefpunkts des Modellgebiets abgeschätzt. Durch Georeferenzierung und Verschneidung mit dem digitalen Geländemodell ergibt sich eine Darstellung der Wasserstände zum Vergleich mit den Simulationsergebnissen (siehe Abbildung 4-8, rechts).

Das zugehörige Niederschlagsereignis wurde an einem nur 300 Meter entfernten Regenschreiber registriert. Es handelt sich um ein Ereignis von 105 Minuten Dauer und einer Niederschlagssumme von 54 mm, was einer statistischen Wiederkehrzeit von ca. 50 Jahren entspricht. Das historische Niederschlagsereignis geht in seinem originären zeitlichen Verlauf als Niederschlagsbelastung im Referenzmodell ein. Abbildung 4-8 zeigt die mit dem Referenzmodell berechneten Wasserstände (links) im Vergleich zu den aus dem Video abgeleiteten Wasserständen (rechts, dargestellt als Verschneidung mit dem digitalen Geländemodell).

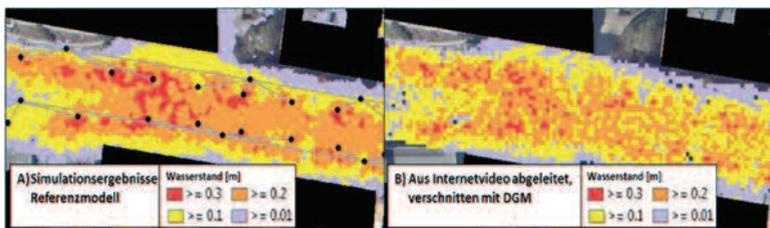


Abbildung 4-8: Berechnete (A) und beobachtete (B) Wasserstände für das historische Ereignis

Eine gute Übereinstimmung von simulierten mit beobachteten Wasserständen ist erkennbar.

Zum Überflutungsgeschehen in Modellgebiet 2 stehen Informationen zu zwei außergewöhnlichen Starkregenereignissen (statistische Wiederkehrzeit ca. 50 Jahre)

zur Verfügung. Da der Regenschreiber sich im Nachbarort befindet, ist nicht sichergestellt, dass sich das Zentrum der Starkregenzelle jeweils über Modellgebiet 2 befand. Bildmaterial von der Situation während der Ereignisse im Modellgebiet steht nicht zur Verfügung. Folgende Erkenntnisse zum Überflutungsgeschehen im Modellgebiet lassen sich aber aus der Ereignisdokumentation entnehmen (SEKL 2017):

- Starke Außengebietszuflüsse
- Starke Füllung des Rückhaltebeckens vor der Sperrmauer
- Wasserübertritt aus der von Norden kommenden Landstraße im Bereich der ersten Stichstraße im Siedlungsgebiet

Diese Phänomene sind auch in den Ergebnissen des Referenzmodells erkennbar.

### **4.3 Definition von Vergleichsindikatoren (quantitativ/qualitativ)**

Ziel der Arbeit ist es, die Auswirkungen unterschiedlicher Modellansätze auf die Gefährdungsaussage hinsichtlich Starkregenüberflutung zu analysieren und zu bewerten. Darüber hinaus sollen Handlungsempfehlungen zur Modellkonfiguration in Abhängigkeit der Art der Zielsetzung und der Gebieteigenschaften abgeleitet werden. Aus diesen beiden Zielstellungen ergeben sich zwei Anforderungen an die Methodik zum Vergleich der unterschiedlichen Modellkonfigurationen. Die Methodik muss zum einen Indikatoren enthalten, die den Unterschied hinsichtlich der Gefahren- und Gefährdungsaussage aufzeigen. Diese Indikatoren orientieren sich daran, wie Gefährdung und Gefahr klassifiziert, dargestellt und kommuniziert wird (siehe Kapitel 2.3.5). Zum anderen werden Vergleichsindikatoren benötigt, die feinere Auswirkungen der Modellunterschiede aufzeigen, um generelle Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Modellkonfigurationen und dem simulierten Abflussgeschehen auf der Oberfläche und im Kanal zu identifizieren (reine Sensitivitätsindikatoren). Die folgenden Vergleichsindikatoren werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse verwendet und nachfolgend erläutert:

Tabelle 4-5: Übersicht Vergleichsindikatoren

Gefahrenindikatoren	Maximaler Wasserstand auf der Fläche
	Maximale Fließgeschwindigkeit auf der Fläche
Gefährdungsindikatoren	Anzahl Gebäude nach maximalem Wasserstand
	Anzahl Gebäude nach maximaler Fließgeschwindigkeit
	Gebäudekantenlänge nach maximalem Wasserstand
	Betroffene Gebäudewandfläche nach maximalem Wasserstand
Reine Sensitivitätsindikatoren	Austretender Abfluss an den Kopplungspunkten
	Eintretender Abfluss an den Kopplungspunkten
	Maximale Wassermenge auf der Oberfläche
	Zeitpunkt der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche

Für eine vereinfachte Vergleichbarkeit der Ergebnisse in den betrachteten Varianten und Modellgebieten werden für die Indikatoren zur Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung sogenannte Summenindikatoren eingeführt. Diese werden nachfolgend näher definiert.

#### 4.3.1 Wasserstand auf der Oberfläche

In der Regel bildet der Wasserstand auf der Oberfläche die Hauptgrundlage für die Bilanzierung von Überflutungsgefahren und damit auch Überflutungsgefährdungen. Im Rahmen dieser Sensitivitätsanalyse ist der Wasserstand auf der Oberfläche hauptsächlich als maximaler Wasserstand betrachtet.

*Vergleichsindikator „Maximaler Wasserstand in der Fläche“*

Zur Bestimmung des maximalen Wasserstandes in der Fläche wird für jedes Element des Oberflächenmodells der maximale Wasserstand ermittelt, der sich innerhalb der Simulationszeit einstellt. Der Zeitpunkt für den maximalen Wasserstand eines Elements kann von Element zu Element variieren. Die Karten zum maximalen Wasserstand müssen also nicht zwingend mit der Situation zu einem bestimmten Simulationszeitpunkt übereinstimmen. Die maximalen Wasserstände in der Fläche werden entsprechend des Vorschlags aus DWA-M 119, wie in Tabelle 4-6 ersichtlich, klassifiziert. Dadurch wird eine Bewertung der Einflussgrößen ermöglicht, die die Vergleichbarkeit hinsichtlich der ableitbaren Gefahrenaussage miteinschließt.

Tabelle 4-6: Klassifizierung des Vergleichsindikators „maximaler Wasserstand auf der Fläche“

Wasserstand (h)	Gefahrenklasse (GK <sub>h</sub> )
< 10 cm	1
10 cm – 30 cm	2
30 cm – 50 cm	3
> 50 cm	4

Die maximalen Wasserstände werden für den qualitativen Vergleich entsprechend der Klassifizierung farblich abgestuft in den Gefährdungskarten dargestellt. Für den quantitativen Vergleich wird die Gesamtfläche je Gefahrenklasse bilanziert ( $x_1$  [m<sup>2</sup> GK<sub>h</sub> 1],  $x_2$  [m<sup>2</sup> GK<sub>h</sub> 2]...).

Die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr wird zur Verbesserung der Vergleichbarkeit auch als Summenindikator für das gesamte betrachtete Gebiet bilanziert. Der Wert des Summenindikators zur wasserstandbedingten Überflutungsgefahr bildet sich aus der Summe der Flächen, gewichtet nach der jeweilig vorliegenden Gefahrenklasse. Für die Berechnung aller Summenindikatoren der vorliegenden Untersuchung werden die in Tabelle 4-7 angegebenen Gewichtungsfaktoren in Abhängigkeit der vorliegenden Gefahren- bzw. Gefährdungsklasse verwendet.

Tabelle 4-7: Gewichtungsfaktoren nach Gefahren- und Gefährdungsklassen zur Bestimmung der Summenindikatoren

Gefahren- oder Gefährdungsklasse (GK)	Gewichtungsfaktor
1	0
2	1
3	2
4	3

Beispiel zur Berechnung des Summenindikators (SI) zur wasserstandbedingten Gefahr:

$$SI_{\text{Gefahr, Wasserstand}} = x_1 [\text{m}^2 \text{ GK}_{h1}] \times 0 + x_2 [\text{m}^2 \text{ GK}_{h2}] \times 1 + x_3 [\text{m}^2 \text{ GK}_{h3}] \times 2 + x_4 [\text{m}^2 \text{ GK}_{h4}] \times 3$$

Dies kann allgemein geschrieben werden als:

$$SI_{\text{Gefahr, Wasserstand}} = \sum_{n=2}^4 (x_n \times (n-1)) \quad (4.1)$$

Für ein beispielhaftes Simulationsergebnis bei dem 20 m<sup>2</sup> Fläche der Gefährdungsklasse GK<sub>n</sub>1, 15 m<sup>2</sup> der Gefährdungsklasse GK<sub>n</sub>2, 4 m<sup>2</sup> der Gefährdungsklasse GK<sub>n</sub>3 und 1 m<sup>2</sup> der Gefährdungsklasse GK<sub>n</sub>4 zugeordnet wäre, würde sich der Summenindikator zur wasserstandbedingten Gefahr zu  $20 \times 0 + 15 \times 1 + 4 \times 2 + 1 \times 3 = 26$  ergeben.

### 4.3.2 Fließgeschwindigkeit auf der Oberfläche

Neben dem Wasserstand bildet die Fließgeschwindigkeit auf der Oberfläche einen weiteren Indikator für eine Überflutungsgefahr (siehe Kapitel 2.3.5). Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse stellt sie einen ergänzenden Vergleichsindikator dar, bspw. bei der Betrachtung verschiedener Oberflächenrauheiten.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse ist die Fließgeschwindigkeit auf der Oberfläche hauptsächlich als maximale Fließgeschwindigkeit in der Fläche betrachtet.

#### *Vergleichsindikator „Maximale Fließgeschwindigkeit in der Fläche“*

Zur Bestimmung der maximalen Fließgeschwindigkeit in der Fläche wird für jedes Element des Oberflächenmodells die maximale Fließgeschwindigkeit ermittelt, die sich innerhalb der Simulationszeit einstellt. Der Zeitpunkt für die maximale Fließgeschwindigkeit eines Elements kann – wie auch für die Wasserstände ausgeführt – von Element zu Element variieren. Die Karten zur maximalen Fließgeschwindigkeit müssen also nicht zwingend mit der Situation zu einem bestimmten Simulationszeitpunkt übereinstimmen. Die maximalen Fließgeschwindigkeiten in der Fläche werden entsprechend der Empfehlung im Leitfaden „Kommunales Starkregensrisikomanagement in Baden-Württemberg“ (LUBW 2016), wie in Tabelle 4-8 ersichtlich, klassifiziert. Dadurch wird eine Bewertung der Einflussgrößen ermöglicht, die die Vergleichbarkeit hinsichtlich der ableitbaren Gefahrenaussage beinhaltet.

Tabelle 4-8: Klassifizierung des Vergleichsindikators „maximale Fließgeschwindigkeit in der Fläche“

Fließgeschwindigkeit (v)	Gefahrenklasse (GK <sub>v</sub> )
< 0,2 m/s	1
0,2 m/s – 0,5 m/s	2
0,5 m/s – 2 m/s	3
> 2 m/s	4

Die maximalen Fließgeschwindigkeiten werden in den Gefährdungskarten für den qualitativen Vergleich entsprechend der Klassifizierung farblich abgestuft darge-

stellt. Für den quantitativen Vergleich wird die Gesamtfläche je Gefahrenklasse bilanziert ( $x_1$  [m<sup>2</sup> GK<sub>v</sub> 1],  $x_2$  [m<sup>2</sup> GK<sub>v</sub> 2]...). Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse gehen nur Oberflächenelemente, die einen Wasserstand von mindestens 10cm aufweisen, in die Betrachtung zur Fließgeschwindigkeit ein.

Die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr wird für eine vereinfachte Vergleichbarkeit auch als Summenindikator für das gesamte betrachtete Gebiet bilanziert. Der Wert des Summenindikators bildet sich analog zur wasserstandbedingten Überflutungsgefahr aus der Summe der, nach der jeweilig vorliegenden Gefahrenklasse gewichteten Flächen. Für die Berechnung werden die in Tabelle 4-7 angegebenen Gewichtungsfaktoren in Abhängigkeit der vorliegenden Gefahrenklasse verwendet.

### 4.3.3 Indikatoren zur objektbezogenen Überflutungsgefährdung

Die Auswirkung verschiedener Modellkonfigurationen auf die Gefährdungsaussage wird mit Hilfe von Vergleichsindikatoren zur objektbezogenen Überflutungsgefährdung untersucht. Hierbei wird durch Verschneidung der ermittelten Überflutungsgefahr (Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten) mit Informationen zur Exposition relevanter Objekte (hier Gebäude) die Überflutungsgefährdung ermittelt. Es werden die folgenden vier Gefährdungsindikatoren betrachtet:

#### *Gebäude nach maximalem Wasserstand*

Für diesen Indikator ist den Gebäuden innerhalb der Modellgebiete der unmittelbar angrenzende maximale Wasserstand zugeordnet. Dazu ist der maximale Wasserstand aller Oberflächenelemente, die sich bis zu 10 cm von der Gebäudekante entfernt befinden, ermittelt. Die so identifizierten maximalen Wasserstände je Gebäude sind analog zur Klassifizierung des Gefahrenindikators „Maximaler Wasserstand in der Fläche“ in vier Gefährdungsklassen eingeteilt (siehe Tabelle 4-6). Die Auswertung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse erfolgt zum einen über die entsprechend der Gefährdungsklassen farblich abgestufte Darstellung der Gebäude in den Gefährdungskarten. Zum anderen erfolgt ein quantitativer Vergleich der Varianten nach der Anzahl der Gebäude je Gefährdungsklasse ( $x_1$  [GK<sub>h</sub> 1],  $x_2$  [GK<sub>h</sub> 2] etc.).

Die wasserstandbedingte Überflutungsgefährdung wird für eine vereinfachte Vergleichbarkeit auch als Summenindikator für das gesamte betrachtete Gebiet bilanziert. Der Wert des Summenindikators bildet sich analog zur wasserstandbedingten Überflutungsgefahr aus der Anzahl der Gebäude, gewichtet nach der jeweilig vorliegenden Gefahrenklasse. Für die Berechnung werden die in Tabelle 4-7 angegebenen Gewichtungsfaktoren in Abhängigkeit der vorliegenden Gefährdungsklasse verwendet.

### *Gebäude nach maximaler Fließgeschwindigkeit*

Für diesen Indikator ist den Gebäuden die unmittelbar angrenzende maximale Fließgeschwindigkeit zugeordnet. Dazu wird die maximale Fließgeschwindigkeit aller Oberflächenelemente, die sich bis zu 10 cm von der Gebäudekante entfernt befinden, ermittelt. Die so identifizierten maximalen Fließgeschwindigkeiten je Gebäude sind, analog zur Klassifizierung des Gefahrenindikators „Maximale Fließgeschwindigkeit in der Fläche“, in vier Gefährdungsklassen unterteilt (siehe Tabelle 4-8). Die Auswertung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse erfolgt zum einen über die entsprechend der Gefährdungsklassen farblich abgestufte Darstellung der Gebäude in den Gefährdungskarten. Zum anderen erfolgt ein quantitativer Vergleich der Varianten nach der Anzahl der Gebäude je Gefährdungsklasse ( $x_1$  [GK<sub>v</sub> 1],  $x_2$  [GK<sub>v</sub> 2]...).

Auch die wasserstandbedingte Überflutungsgefährdung wird für eine vereinfachte Vergleichbarkeit als Summenindikator für das gesamte betrachtete Gebiet bilanziert. Der Wert des Summenindikators bildet sich analog zur wasserstandbedingten Überflutungsgefahr aus der Summe der Gebäude, gewichtet nach der jeweilig vorliegenden Gefahrenklasse. Für die Berechnung werden die in Tabelle 4-7 angegebenen Gewichtungsfaktoren in Abhängigkeit der vorliegenden Gefährdungsklasse verwendet.

### *Gebäudekantenlänge nach maximalem Wasserstand*

Die Klassifizierung ganzer Gebäude infolge des Wasserstands an der Gebäudekante (siehe Indikator „Gebäude nach maximalem Wasserstand“) lässt keine Rückschlüsse auf das Ausmaß der Exposition, d.h. die Länge der betroffenen Gebäudekante, zu. Ein Gebäude mit einer Kantenlänge von 500 m wird beispielsweise ebenso in Gefährdungsklasse 2 eingeteilt, wenn es rundum oder nur auf einem Meter Länge von dem entsprechenden Wasserstand betroffen ist.

Mit dem Indikator „Gebäudekantenlänge nach maximalem Wasserstand“ wird daher die betroffene Gebäudekantenlänge innerhalb der Modellgebiete und Varianten ermittelt und entsprechend des maximalen Wasserstandes analog Tabelle 4-6 in die vier Gefährdungsklassen eingeteilt. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden dann die Gebäudekantenlängen je Gefährdungsklasse für das Referenzmodell und die Varianten verglichen.

### *Betroffene Gebäudewandfläche nach maximalem Wasserstand*

Dieser Indikator bildet sich aus dem Produkt aus Gebäudekantenlänge und den jeweiligen maximalen Wasserständen. Hierbei wird die Länge aller Gebäudekanten, die einem Wasserstand von über 10 cm ausgesetzt sind (mindestens GK 2), mit dem jeweiligen Wasserstand multipliziert. Für das Gesamtgebiet ergibt sich in Summe die betroffene Gebäudewandfläche, die als quantitativer Vergleichsindikator im Rahmen der Sensitivitätsanalyse verwendet werden kann.

#### 4.3.4 Reine Sensitivitätsindikatoren

##### *Austausch an den Kopplungspunkten*

Einen Schwerpunkt der Sensitivitätsanalyse bilden unterschiedliche Ansätze zur Modellierung der Kopplungspunkte zwischen dem 1D-Kanalnetzmodell und dem 2D-Oberflächenmodell. Besonders diese Ansätze, neben anderen, die nicht direkt mit den Kopplungspunkten zu tun haben, können starke Auswirkungen auf das Austauschvolumen am Kopplungspunkt haben. Zur Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher Ansätze auf das Geschehen an den Kopplungspunkten wird der eintretende Abfluss ( $2D \rightarrow 1D$ ) und der austretende Abfluss ( $1D \rightarrow 2D$ ) als Maximum und Summe (Abflussvolumen) bilanziert. Auch der zeitliche Verlauf wird analysiert. So können z.B. Phasen starken Überstaus bzw. Kanaleintritts identifiziert werden. Die Bilanzen werden darüber hinaus hinsichtlich der verschiedenen Arten von Kopplungspunkten (Schächte, Straßenabläufe und Hofabläufe) differenziert.

##### *Wassermenge auf der Oberfläche im Gesamtgebiet*

Der Indikator „Wassermenge auf der Oberfläche im Gesamtgebiet“ zeigt das Volumen auf der Oberfläche an, das sich zu einem Zeitpunkt während der Simulationszeit einstellt. Weiterhin dient der Zeitpunkt, an dem sich das maximale Volumen einstellt, als Vergleichsindikator für die Sensitivitätsanalyse. Auch der zeitliche Verlauf des Volumens auf der Oberfläche kann betrachtet werden.

### 4.4 Definition der betrachteten Einflussgrößen

#### 4.4.1 Einfluss der Auflösung des triangulierten Oberflächenmodells (Variante 1)

Neben den zugrunde liegenden Höhendaten besteht eine weitere Einflussgröße in der darauf aufbauenden Triangulation des Berechnungsnetzes für den Oberflächenabfluss. Zur Erstellung des Rechnernetzes wird in der für die Erstellung dieser Arbeit verwendeten Software die nach Shewchuk erweiterte Delaunay-Triangulation verwendet. Diese Triangulationsmethode zielt auf die Generierung von näherungsweise gleichseitigen Dreiecken ab. Die Auflösung des Dreiecksnetzes kann durch die Vorgabe der maximalen Dreiecksgröße und des minimalen Innenwinkels beeinflusst werden. Die Größe der Dreiecke ist nach unten nicht zu begrenzen (siehe auch Kapitel 2.2.3, 3.2.1 und 4.1.1).

Mit steigender Auflösung des Oberflächenmodells erhöht sich die Anzahl an Oberflächenelementen, für die eine Berechnung durchgeführt wird. Für die Simulation bedeutet das, je größer die Auflösung des Oberflächenmodells...

- ...desto größer ist die Rechenzeit.
- ...desto größer ist der erforderliche Arbeitsspeicher.
- ...desto kleiner ist das berechenbare Gebiet.
- ...desto besser ist die Abbildung der Oberfläche und Oberflächenstrukturen, vorausgesetzt die Datengrundlage gewährleistet den entsprechenden Detaillierungsgrad

Darüber hinaus beeinflusst die gewählte Auflösung des Oberflächenmodells auch die Modellierung der Kopplungspunkte, da sie die Größe des Kopplungsdreiecks beeinflusst.

Die maximale Dreiecksgröße ist im Referenzmodell auf 1 m<sup>2</sup> und der kleinste Innenwinkel auf 15° festgelegt.

- Für Modellgebiet 1 (flache Topografie/urban) ergeben sich so im Referenzmodell 189.653 Elemente bei einer Größe des 2D-Berechnungsgebiets von 15,6 ha. Die Rechenzeit für den Euler Modellregen Typ 2 mit Dauer 60 Minuten und statistischer Häufigkeit  $n = 0,02$  nach KOSTRA-DWD 2010 (MR60n002) mit 90 Minuten simulierter Zeit beträgt 168 Minuten.
- Für Modellgebiet 2 (bewegte Topografie/ländlich) ist im Außenbereich (59,1 ha) eine niedrigere Auflösung mit einer maximalen Elementgröße von 20 m<sup>2</sup> festgelegt. Im Siedlungsbereich (18,8 ha) ist die Auflösung analog Modellgebiet 1 mit einer maximalen Elementgröße von 1 m<sup>2</sup> angesetzt. Es ergeben sich so im Referenzmodell 338.499 Elemente. Die Rechenzeit für den MR60n002 mit 90 Minuten simulierter Zeit beträgt 222 Minuten.

In der Variante 1 wird die Auflösung des Oberflächenmodells verringert. Die maximale Dreiecksgröße wird auf 10 m<sup>2</sup> hochgesetzt.

- Für Modellgebiet 1 (flache Topografie/urban) ergeben sich so in Variante 1 77.625 Elemente bei einer Größe des 2D-Berechnungsgebiets von 15,6 ha. Die Zahl der Elemente nimmt also in der Variante 1 um 60% ab. Im Umkehrschluss könnte also theoretisch mit der gröberen Auflösung ein gegenüber dem Referenzzustand um ca. 60% größeres Gebiet mit der gleichen Arbeitspeicherausnutzung wie im Referenzzustand gekoppelt berechnet werden. Die Rechenzeit für den MR60n002 mit 90 Minuten simulierter Zeit beträgt 82 Minuten, reduziert sich also um ca. 50%.
- Für Modellgebiet 2 (bewegte Topografie/ländlich) gilt im Außenbereich die niedrigere Auflösung mit einer maximalen Elementgröße von 20 m<sup>2</sup> entsprechend dem Referenzmodell. Im Siedlungsbereich (18,8 ha) ist die Auflösung

analog Modellgebiet 1 mit einer maximalen Elementgröße von 10 m<sup>2</sup> angesetzt. Es ergeben sich so in Variante 1 138.866 Elemente. Auch hier nimmt die Zahl der Elemente im Vergleich zum Referenzzustand um 60% ab. Die Rechenzeit für den MR60n002 mit 90 Minuten simulierter Zeit beträgt 102 Minuten und reduziert sich damit um etwas mehr als die Hälfte.

Variante 1 hat durch die Verringerung der Auflösung des Oberflächenmodells infolge der Anhebung der maximalen Elementgröße deutlich positive Auswirkungen auf den Arbeitsspeicherbedarf und auf die Rechenzeit als Folge der geringeren Anzahl an Oberflächenelementen. Die damit ansteigende berechenbare Gebietsgröße mit abnehmender Auflösung macht eine entsprechende Modellanpassung interessant. Dieser Umstand rechtfertigt die Untersuchung der Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse sowie auf die daraus ableitbare Gefahren- und Gefährdungsaussage (siehe Kapitel 5.2.1), um zu einer Aussage über die zulässige maximale Elementgröße zu kommen.

#### 4.4.2 Einfluss der Abbildung des Kopplungspunktes (Variante 2)

In dieser Variante wird der Einfluss der Modellierung der Kopplung zwischen dem 1D-Kanalnetzmodell mit dem 2D-Oberflächenmodell über verschiedene Kopplungspunkte untersucht. Es soll die Frage geklärt werden, wie stark sich die Ergebnisse von Modellsätzen mit und ohne Modellierung von Straßenabläufen bzw. Hofabläufen unterscheiden. Im Referenzmodell findet die Kopplung möglichst realitätsnah sowohl über Straßenabläufe und Schächte als auch über die Hofabläufe statt. In dieser Variantenbetrachtung werden die folgenden drei alternativen Modellsätze betrachtet:

*Variante 2a:* In dieser Variante werden keine Straßenabläufe modelliert, die Kopplung im Straßenraum findet allein über die Schächte statt. Hierbei handelt es sich um einen konventionellen Ansatz für den Fall, dass die Straßenabläufe nicht im Kanalnetzmodell enthalten sind. Im Gegensatz zum Referenzmodell werden in der Variante 2a die Schächte als offen angesetzt, um die fehlende Abbildung der Straßenabläufe zu kompensieren. Der hydraulische Zusammenhang an den Schächten wird mittels der Überfallformel abgebildet. Die Hofabläufe bleiben im Modell implementiert, um abweichende Effekte zwischen dieser Variante und dem Referenzmodell allein auf die Entfernung der Straßenabläufe zurückführen zu können.

*Variante 2b:* In dieser Variante werden im Vergleich zum Referenzmodell die Hofabläufe entfernt. Sowohl die Straßenabläufe bleiben enthalten als auch die direkte Berechnung der Hofflächen. Hintergrund ist die noch weit geringere Verfügbarkeit von Daten zu Hofabläufen im Vergleich zu Daten zu Straßenabläufen.

*Variante 2c:* In dieser Variante wird zusätzlich zur Entfernung der Hofabläufe der Niederschlagsabfluss der Hofflächen im 1D-Kanalnetzmodell modelliert. Somit wird der Abfluss von Dach-, Hof- und Grünflächen im Hofbereich direkt dem 1D-

Kanalnetzmodell zugegeben. Die Straßenflächen und Grünflächen im Straßenraum werden dagegen weiterhin direkt berechnet.

#### 4.4.3 Einfluss des hydraulischen Ansatzes zur Kopplung 1D/2D (Variante 3)

Mit dieser Variantenbetrachtung soll die Sensitivität bzgl. unterschiedlicher hydraulischer Modellansätze an den Kopplungspunkten untersucht werden. Im Referenzmodell ist hier ein sehr detaillierter und differenzierter Ansatz gewählt (siehe Kapitel 4.1.6). In den folgenden alternativen Modellansätzen wird dieser detaillierte Ansatz modifiziert oder reduziert.

*Variante 3a:* In dieser Variante wird der konventionelle Ansatz am Kopplungspunkt gewählt. Der Abfluss von der Oberfläche in das Kanalnetz (2D→1D) wird über die Wehrüberfallformel abgebildet. Der Austritt des Wassers aus dem Kanalnetz an die Oberfläche (1D→2D) infolge Rück- und Überstau wird über die Energiegleichung abgebildet. Da die Kopplung in der Variante 3a weiterhin wie im Referenzmodell über Straßenabläufe, Hofabläufe und Schächte stattfindet, werden die Schächte nicht als offen angesetzt, wie es in den Varianten 2a und 4a der Fall ist. Aus diesem Grund muss bei Ansatz der Wehrüberfallformel hier eine Anpassung der lichten Schachtfäche im Modell vorgenommen werden, da das Programm aus dieser direkt die Wehrbreite als Umfang generiert. Die Überlegungen zur Wahl einer entsprechenden Öffnungsfläche/Umfang ziehen folgende möglichen Ansätze in Betracht:

**Ansatz 1:** Addition der Umfänge der Lüftungslöcher im Schachtdeckel und entsprechende Rückrechnung einer einzustellenden Öffnungsfläche:

Hieraus resultiert eine sehr lange Wehrbreite und eine entsprechend große Öffnungsfläche, die über den Werten bei Ansatz offener Schächte liegt. Dieser Ansatz wird daher als realitätsfern und hydraulisch nicht zutreffend verworfen.

**Ansatz 2:** Ansatz der realen Öffnungsfläche der Lüftungslöcher:

Die resultierende Wehrbreite (=Umfang) hat zwar keinen Realitätsbezug, liegt aber bedeutend unter der Wehrbreite bei geöffnetem Schacht (siehe Ansatz 1).

Beide Möglichkeiten zeigen die fehlende Eignung der Verwendung der Wehrüberfallformel bei dem Versuch den hydraulischen Zusammenhang bei geschlossenem Schachtdeckel abzubilden. Dies bestätigt die Entscheidung von diesem Ansatz im Referenzmodell abzusehen. Für Variante 3a wird der Ansatz der realen Öffnungsfläche der Lüftungslöcher verwendet (Ansatz 2). Dieser hat den Vorteil, dass bei Rückstau und Kanalausstritt (1D→2D) (Ansatz der Energieformel) die korrekte Öffnungsfläche eingestellt ist.

Auch bei den Straßen- und Hofabläufen stellt sich die Frage nach der einzustellenden Öffnungsfläche und der daraus resultierenden Wehrbreite. Auch hier können mehrere mögliche Ansätze in Betracht gezogen werden:

**Ansatz 1:** Definition der angeströmten und der beiden seitlichen Kanten des Straßenablaufs als Wehrbreite (Abbildung 4-9) wie z.B. in (tandler.com GmbH 2016) vorgeschlagen.

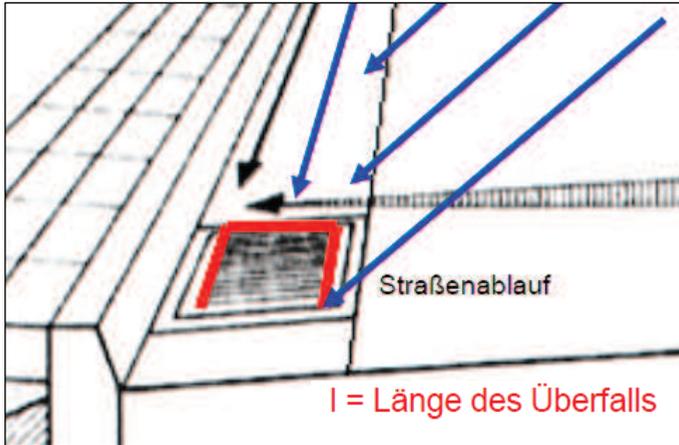


Abbildung 4-9: Definition der angeströmten und der beiden seitlichen Kanten des Straßenablaufs als Wehrbreite (tandler.com GmbH 2016)

Kritikpunkte:

- Es besteht keine wasserstandabhängige Flexibilität, denn bereits zu Beginn des Zuflusses zum Straßenablauf werden alle drei Kanten als Wehrbreite angesetzt, obwohl nur Wasser aus der Anströmrichtung zufließt. Bei oberflächlichem Rückstau auf der Straße wird die unterhalb gelegene Kante des Straßenablaufs nicht berücksichtigt.
- Der Einfluss der Querstreben des Aufsatzes wird nicht berücksichtigt.

**Ansatz 2:** Definition der Wehrbreite über die Anzahl und Länge der Querstreben:

Kritikpunkte:

Auch hier besteht keine wasserstandabhängige Flexibilität bezüglich des hydraulischen Ansatzes. Insbesondere bei geringem Zufluss/Wasserstand wird eine unverhältnismäßig hohe Wehrbreite angesetzt.

Die Wahl eines befriedigenden/begründbaren Ansatzes unter alleiniger Verwendung der Überfallformel für die Modellierung der Straßen- und Hofabläufe ist nach Einschätzung des Autors nicht möglich, da der Abflussvorgang am Kopplungspunkt weitaus komplexer erscheint. In Variante 3a wird die Öffnungsfläche gemäß des ersten Ansatzes gewählt, da dieser als konventioneller Ansatz bei Modellierung von Straßenabläufen angesehen werden kann und in Ansatz 2 eine unverhältnismäßig große Wert für die Wehrbreite zustande kommt.

*Variante 3b:* In dieser Variante wird der Modellansatz des Referenzmodells lediglich um die Neigungsabhängigkeit der Zuweisung eines hydraulischen Kopplungsansatzes reduziert. Die hydraulische Kopplung an den Straßenabläufen wird unabhängig von der jeweiligen Straßenlängsneigung und damit einheitlich zugewiesen. Als einheitlicher Ansatz wird die Q-H-Beziehung aus MKULNV NRW (2016) für ein Gefälle von 2,5% („ohne Vorbeifluss“) gewählt (siehe Kapitel 4.1.6).

*Variante 3c:* In dieser Variante wird die Kapazität des Ein- und Austritts an den Straßenabläufen begrenzt.

Die maximale Kapazität von Straßenabläufen ist von mehreren Faktoren abhängig (Gitter, Fangkorb, Zuleitung etc.). Aus diesen Gründen fällt eine pauschale Annahme schwer. In (Kemper et al. 2016) konnten an numerischen Modellen von Straßenabläufen selbst bei starken Verlegungen des Fangkorbs (60%) noch Abflüsse von bis zu 20 l/s abgeleitet werden, ohne dass es zu Rückstau, bzw. Überstau an die Oberfläche kam. In Variante 3c wird die maximale Austauschkapazität am Straßenablauf entsprechend auf 20 l/s festgelegt.

*Variante 3d:* In dieser Variante wird die Modellierung eines Heraushebens der Kanaldeckel bei entsprechendem Druck zurückgenommen. Auch bei hohen Drücken wird lediglich die Öffnungsfläche der Lüftungslöcher beim Kanalaustritt an den Schächten unterstellt. Diese Untersuchung begründet sich durch die noch nicht weit verbreitete Möglichkeit einer entsprechenden Modellierung in den Softwarelösungen sowie durch die bestehenden Unsicherheiten bei der exakten Abbildung dieses Phänomens.

#### **4.4.4 Einfluss der Abflusskonzentration (Variante 4)**

In dieser Variantenbetrachtung wird der Einfluss abweichender Ansätze zur Abflusskonzentration untersucht. Während im Referenzmodell lediglich der Abfluss der Dachflächen dem Kanalnetzmodell direkt zugegeben wird und die übrigen Flächen im 2D-Oberflächenmodell beregnet werden, wird hier im Vergleich dazu der konventionelle Ansatz der rein hydrologischen Abflusskonzentration betrachtet, bei dem der Niederschlagsabfluss aller Flächen direkt dem 1D-Kanalnetzmodell zugegeben wird. Zu Abfluss im 2D-Oberflächenmodell kommt es mit diesem Ansatz nur im Fall austretenden Wassers aus dem 1D-Kanalnetzmodell.

*Variante 4a:* Diese Variante entspricht dem konventionellen Ansatz der gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung. Neben dem Ansatz einer rein hydrologischen Abflusskonzentration findet die Kopplung zwischen dem 1D-Kanalnetzmodell und dem 2D-Oberflächenmodell ausschließlich über die Schächte statt. Straßenabläufe und Hofabläufe werden im Gegensatz zum Referenzmodell nicht modelliert. Die Schächte werden als offen (ohne Schachtdeckel) angenommen. Der hydraulische Zusammenhang an den Schächten wird über die Überfallformel abgebildet.

*Variante 4b:* Auch in Variante 4b wird eine rein hydrologische Abflusskonzentration angesetzt. In dieser Variante bleiben die Straßenabläufe und Hofabläufe jedoch im Modell enthalten. Der hydraulische Zusammenhang wird an allen Kopplungspunkten analog dem Referenzmodell gewählt. Während in Variante 4a schwerpunktmäßig der Vergleich zwischen dem konventionellen Ansatz mit dem Referenzmodell im Fokus steht, ist das Ziel der Betrachtung von Variante 4b die alleinige Quantifizierung des Einflusses der rein hydrologischen Abflusskonzentration.

#### 4.4.5 Einfluss der Oberflächenrauheit (Variante 5)

Im Referenzmodell sind flächenspezifische Oberflächenrauheiten basierend auf Flächennutzungsdaten angesetzt (siehe Kapitel 4.1.2). Da dieser Schritt arbeitsintensiv ist und zudem eine ausreichende Datengrundlage voraussetzt, wird in dieser Variantenbetrachtung der Einfluss unterschiedlicher Ansätze zur Oberflächenrauheit auf die Simulationsergebnisse untersucht. Ziele sind zum einen die Abschätzung der Sensitivitätsspanne, die durch stark unterschiedliche Ansätze zur Oberflächenrauheit möglich ist (Variante 5a und 5b) und zum anderen die Auswirkung einer teilflächenspezifischen Abbildung der Oberflächenrauheit im Gegensatz zur Wahl eines über das Gebiet gemittelten Ansatzes (Variante 5c). Aufgrund der unterschiedlichen Gebietseigenschaften und Datengrundlagen unterscheiden sich die jeweiligen Ansätze in den beiden Modellgebieten.

Für **Modellgebiet 1** (flache Topografie/urban) wurden die Ansätze wie folgt getroffen:

*Variante 5a:* In dieser Variante wird flächendeckend im gesamten 2D-Oberflächenmodell eine glatte Oberflächenrauheit angesetzt: Manning's  $n = 0,0143$  entspricht Manning-Strickler-Beiwert  $k_{St} = 70$  für „Asphalt“ nach Chow (1959).

*Variante 5b:* In dieser Variante wird flächendeckend im gesamten 2D-Oberflächenmodell eine raue Oberflächenrauheit angesetzt: Manning's  $n = 0,0286$  entspricht Manning-Strickler-Beiwert  $k_{St} = 35$  für „kurzes Gras“ nach Chow (1959).

*Variante 5c:* In dieser Variante wird eine flächengemittelte Oberflächenrauheit aus den flächenspezifischen Werten abgeleitet und flächendeckend im gesamten 2D-Oberflächenmodell angesetzt. Für Modellgebiet 1 liegt dieser Wert bei Manning's  $n = 0,0167$  entspricht Manning-Strickler-Beiwert  $k_{St} = 60$ .

Für **Modellgebiet 2** (bewegte Topografie/ländlich) gelten die folgenden Ansätze:

*Variante 5a:* In dieser Variante wird flächendeckend im gesamten 2D-Oberflächenmodell eine glatte Oberflächenrauheit angesetzt: Manning's  $n = 0,016$  entspricht Manning-Strickler-Beiwert  $k_{St} = 62,5$  für „rauer Asphalt“ nach Chow (1959).

*Variante 5b:* In dieser Variante wird flächendeckend im gesamten 2D-Oberflächenmodell eine raue Oberflächenrauheit angesetzt: Manning's  $n = 0,1$  entspricht Manning-Strickler-Beiwert  $k_{St} = 10$  für „Laub-/Nadelwald“ nach Chow (1959).

*Variante 5c:* In dieser Variante wird eine flächengemittelte Oberflächenrauheit aus den flächenspezifischen Werten abgeleitet und flächendeckend im gesamten 2D-Oberflächenmodell angesetzt. Für Modellgebiet 2 liegt dieser Wert bei Manning's  $n = 0,054$  entspricht Manning-Strickler-Beiwert  $kSt = 18,5$ .

#### **4.4.6 Einfluss unterschiedlicher Abflussbildungsansätze (Variante 6)**

Mit der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Software InfoWorks CS/2D ist die Einstellung von Abflussbildungsparametern für das 2D-Oberflächenmodell bei direkter Beregnung nicht möglich. Im Referenzmodell sind über die Anpassung der Niederschlagsbelastung und über die Möglichkeit der Einstellung von kontinuierlichen Verdunstungsverlusten teilflächenspezifische Abflussbildungsansätze modelliert. In dieser Variantenbetrachtung wird die Auswirkung eines extremen (Variante 6a) und eines über das Oberflächenmodell gemittelten Abflussbildungsansatzes (Variante 6b) untersucht. Ziel der Betrachtung von Variante 6a ist die Quantifizierung der Sensitivitätsspanne, die sich durch eine extreme Wahl des Ansatzes zur Verlusthöhe ergibt. Sie dient außerdem als Voruntersuchung für den flächengemittelten Ansatz in Variante 6b. Der flächengemittelte Ansatz in Variante 6b zeigt den Unterschied zu einer räumlichen Differenzierung von Verlustansätzen (Referenzmodell) auf.

Die Abflussbildungsansätze in den rein eindimensional berechneten Außenbereichen der Gebiete abseits des gekoppelt berechneten Gebietes werden nicht verändert.

*Variante 6a:* In dieser Variante wird eine Abflussbildung ohne jegliche Verlustansätze unterstellt.

*Variante 6b:* In dieser Variante wird ein über das Gesamtgebiet flächengemittelter Verlustansatz gebildet.

#### **4.4.7 Einfluss der unterschiedlichen Modellierung von Oberflächenstrukturen (Variante 7)**

In dieser Variantenbetrachtung wird der Einfluss der Abbildung von Oberflächenstrukturen, die nicht oder nur unzureichend im digitalen Geländemodell enthalten sind, untersucht. Dazu werden unterschiedliche Ansätze zur Modellierung von Bordsteinkanten mit dem Ansatz des Referenzmodells verglichen.

*Variante 7a:* In dieser Variante wird die Lage der Bordsteinkanten nicht durch die Definition von Bruchkanten für die Oberflächentriangulation präzisiert. Es werden keine Bruchkanten definiert.

*Variante 7b:* In dieser Variante wird die Lage der Bordsteinkanten durch Definition einer einzelnen Bruchkanten entlang der Bordsteinkante definiert.

*Variante 7c:* In dieser Variante wird die Lage der Bordsteinkante wie im Referenzmodell durch zwei parallel zueinander verlaufende Bruchkanten definiert. Im Vergleich zum Referenzmodell wird der Abstand zwischen den beiden Bruchkanten kleiner gewählt (10 cm). Dies hat eine klar definierte Kante zur Folge, beeinflusst aber den Triangulationsprozess dahingehend, dass im Bordsteinkantenbereich sehr kleine Oberflächendreiecke entstehen, die neben der Rechenzeit und maximalen Gebietsgröße auch die Kopplung im Bereich der Straßenabläufe beeinflussen.

*Variante 7d:* In dieser Variante werden die Bordsteinkanten als sogenannte „walls“ definiert. Dadurch wird im Bereich der Bordsteinkante eine linienförmige Mauer erzeugt, die eine klare Abgrenzung zwischen Straßenraum und Gehwegbereich bewirkt. Die Höhe der so implementierten Mauern wird auf 10 cm festgelegt.

*Variante 7e:* In dieser Variante wird das Oberflächenmodell im Straßenbereich nachträglich um 10 cm abgesenkt. Dies ist ein gebräuchlicher Ansatz zur klaren Profilierung der Straßen und Bordsteinkanten.

## 5 Sensitivitätsanalyse – Durchführung und Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Referenzmodells in den beiden Gebieten beschrieben (Kapitel 5.1). Sie bilden die Grundlage für die anschließende Sensitivitätsanalyse. In Kapitel 5.2 wird der Einfluss der einzelnen Modellvarianten auf die Simulationsergebnisse und die abgeleiteten Aussagen detailliert beschrieben und begründet. Die einzelnen Variantenbetrachtungen enden jeweils mit einer Bewertung. Kapitel 5.3 enthält einen vergleichenden Überblick über die Sensitivitäten in den Varianten. Dieser dient zur Einordnung der Erkenntnisse aus Kapitel 5.2 und zur weitergehenden Ableitung von gebietsspezifischen Sensitivitäten. In Verbindung mit der Zusammenfassung der Erkenntnisse in Kapitel 5.4 wird außerdem die Ableitung von entsprechenden Anwendungsempfehlungen in Kapitel 6 vorbereitet.

### 5.1 Ergebnisse des Referenzmodells

Zunächst werden die Ergebnisse der Simulationen am Referenzmodell in den beiden Modellgebieten beschrieben und die Auswirkungen auf die Vergleichsindikatoren quantifiziert. Für die Simulationen wird ein Modellregen nach Euler Typ II mit einer statistischen Wiederkehrzeit von 50 Jahren und der jeweils maßgeblichen Dauerstufe (siehe Kapitel 4.1.4) angesetzt. Die Konfigurationen der Referenzmodelle in den beiden Modellgebieten sind in Kapitel 4.1 beschrieben.

#### ***Maximale Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten mit gebäudespezifischer Gefährdung***

Abbildung 5-1 zeigt die aus den Simulationsergebnissen erstellte Gefährdungskarte (Wasserstand) für Modellgebiet 1 in der Referenzkonfiguration.

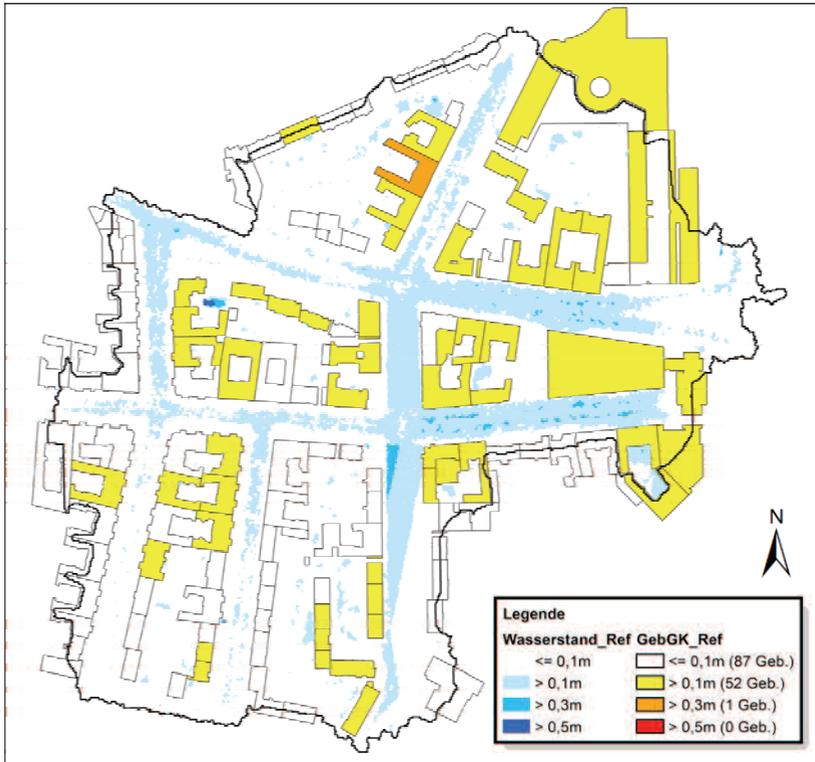


Abbildung 5-1: MG1 Referenzmodell, maximale Wasserstände und gebäudespezifische Gefährdung

Dargestellt sind die maximalen Wasserstände auf der Oberfläche sowie die gebäudespezifische Gefährdung. Die Klassifizierung wurde analog des Vorschlags aus DWA-M 119 gewählt (siehe Kapitel 4.3).

Das Ergebnis zeigt Wasserstände der Gefahrenklassen 2 ( $> 0,1\text{ m}$ ) und 3 ( $> 0,3\text{ m}$ ) in mehreren Straßen. Auch in den Innenhofbereichen kommt es teilweise zu erhöhten Wasserständen. Insgesamt werden von den 140 Gebäuden 52 Gebäude aufgrund des unmittelbar anstehenden Wassers der Gefährdungsklasse 2 zugeordnet, 1 Gebäude wird der Gefährdungsklasse 3 zugeordnet. Zu der Einstufung der Gebäude kommt es aufgrund entsprechender Wasserstände sowohl im Straßenbereich als auch im Hofbereich.

Abbildung 5-2 zeigt die aus den Simulationsergebnissen erstellte Gefährdungskarte (Fließgeschwindigkeit) für Modellgebiet 1 in der Referenzkonfiguration.

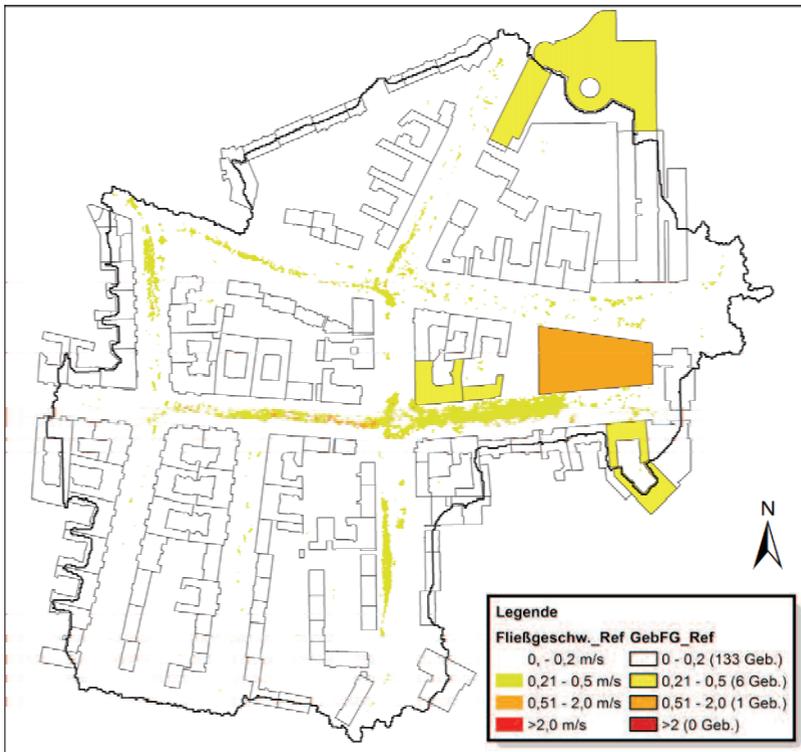


Abbildung 5-2: MG1 Referenzmodell, maximale Fließgeschwindigkeiten und gebäudespezifische Gefährdung

Dargestellt sind die maximalen Fließgeschwindigkeiten auf der Oberfläche sowie die gebäudespezifische Gefährdung. Die Klassifizierung ist analog zum Vorschlag in LUBW (2016) gewählt (siehe Kapitel 4.3).

Das Ergebnis zeigt Fließgeschwindigkeiten der Gefahrenklassen 2 und 3 in mehreren Straßen. In den Innenhofbereichen treten keine erhöhten Fließgeschwindigkeiten auf. Insgesamt werden 6 Gebäude aufgrund hoher Fließgeschwindigkeiten an der Gebäudekante der Gefährdungsklasse 2 zugeordnet, 1 Gebäude wird der Gefährdungsklasse 3 zugeordnet.

Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 zeigen die aus den Simulationsergebnissen erzeugten Gefährdungskarten (Wasserstand und Fließgeschwindigkeiten) für Modellgebiet 2 in der Referenzkonfiguration.

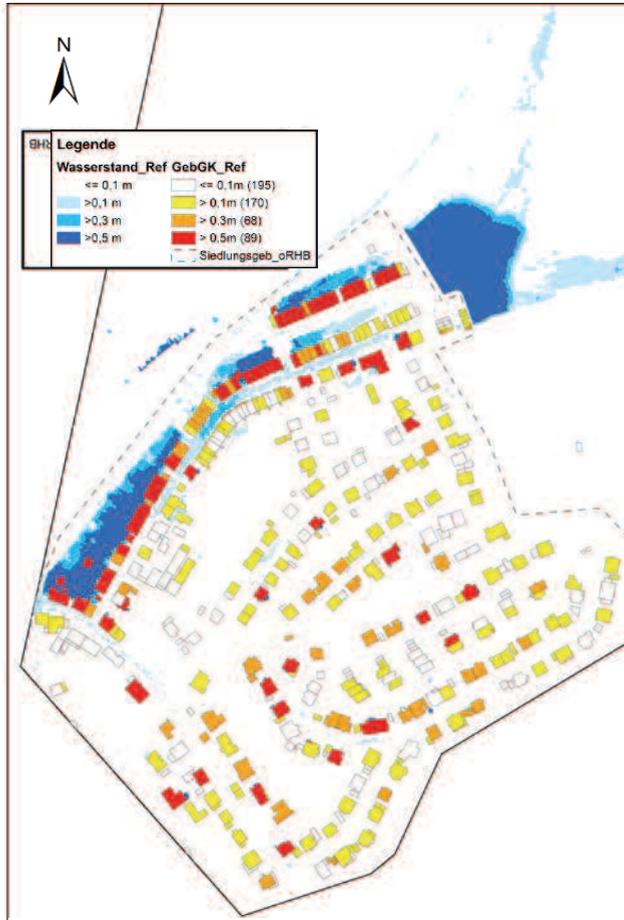


Abbildung 5-3: MG2 Referenzmodell - maximale Wasserstände mit Darstellung der gebäudespezifischen Gefährdung

Dargestellt sind die maximalen Wasserstände bzw. Fließgeschwindigkeiten in der Fläche sowie die gebäudespezifische Gefährdung.

Das Ergebnis zeigt Wasserstände in allen Gefahrenklassen (1), 2, 3 und 4. Hohe Wasserstände stellen sich vereinzelt an Gebäuden in der Hanglage ein sowie vorrangig in der Talsohle im tieferliegenden Bereich der Souterrainwohnungen im Westen und Norden des Gebiets sowie vor der Sperrmauer der Regenrückhaltebecken im Nordosten.

Von den insgesamt 522 Gebäuden werden 170 Gebäude aufgrund des anstehenden Wassers der Gefährdungsklasse 2 zugeordnet, 68 Gebäude werden der Gefährdungsklasse 3 und 89 Gebäude der Gefährdungsklasse 4 zugeordnet. Zu dieser

Einstufung der Gebäude kommt es aufgrund entsprechender Wasserstände sowohl durch lokale Vertiefungen innerhalb der Hanglage als auch durch die Lage von Gebäuden in der überfluteten Talsohle.

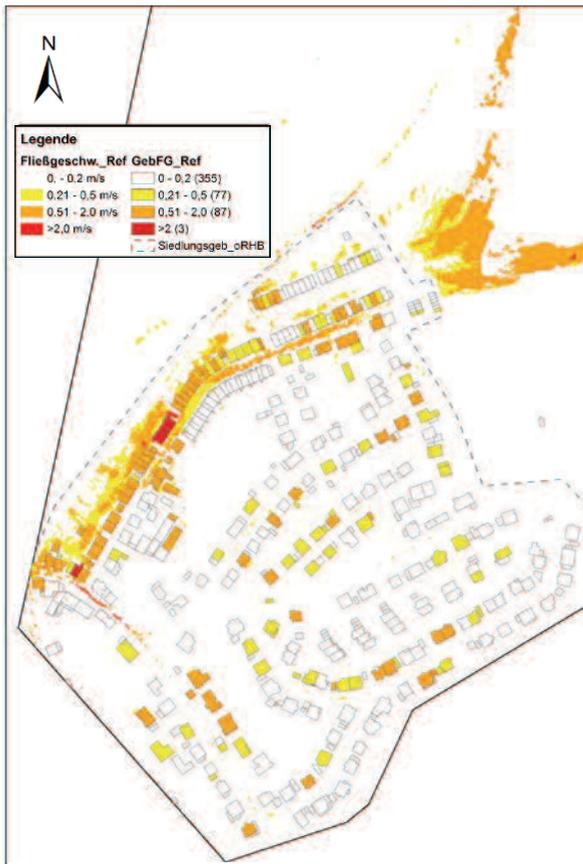


Abbildung 5-4: MG2 Referenzmodell - maximale Fließgeschwindigkeiten ab 10cm Wasserstand mit Darstellung der gebäudespezifischen Gefährdung

Hinsichtlich der Fließgeschwindigkeiten sind hohe Werte in den Außengebieten, im Zulaufbereich des Rückhaltebeckens und auf der von Norden kommenden Landstraße sowie im Bereich der Talsohle zu verzeichnen. Bei einer gebäudespezifischen Gefährdungsklassifizierung auf Basis der Fließgeschwindigkeiten würden 77 Gebäude der Gefährdungsklasse 2 zugeordnet, 87 Gebäude würden der Klasse 3 zugeordnet und 3 Gebäude würden der Klasse 4 zugeordnet.

Tabelle 5-1 fasst die Werte der Gefährdungsindikatoren für die Referenzmodelle der beiden Modellgebiete zusammen. Neben der bereits genannten Gebäudeanzahl je Gefährdungsklasse sind hier die Summenindikatoren, die wie in 4.3 beschrieben

gebildet wurden, enthalten. Des Weiteren ist die Gebäudekantenlänge nach den Gefährdungsklassen klassifiziert sowie die betroffene Gebäudewandfläche mit Wasserständen  $> 0,1$  m dargestellt (Beschreibung der Indikatoren siehe Kapitel 4.3).

Tabelle 5-1: Werte der Gefährdungsindikatoren im Referenzzustand Modellgebiete 1 und 2

		<b>MG 1 (flach/urban)</b>	<b>MG 2 (steil/ländlich)</b>
	GK1	87	195
Anzahl Gebäude nach Gefährdungsklassen (Wasserstand) [-]	GK2	52	170
	GK3	1	68
	GK4	0	89
	Summenindikator Gefährdung (Wasserstand) [-]	54	573
	GK1	10.980	9.324
Gebäudekantenlänge [m]	GK2	344	1.158
	GK3	6	346
	GK4	0	434
	Summe Gebäudekantenlänge $\geq$ GK2 [m]	350	1.938
Summierte Gebäudewandfläche mit Wasserstand $> 0,1$ m [m <sup>2</sup> ]		50	710
	GK1	133	355
Anzahl Gebäude nach Gefährdungsklassen (Fließgeschwindigkeit) [-]	GK2	6	77
	GK3	1	87
	GK4	0	3
	Summenindikator Gefährdung (Fließgeschwindigkeit) [-]	8	260

Beim Vergleich zwischen dem Indikator „Gebäudekantenlänge“ und dem Indikator „Anzahl der Gebäude nach Gefährdungsklassen“ fällt der große relative Unterschied in der Aussage der beiden Indikatoren auf. Während der Gefährdungsklasse 2 bis 4 bei Modellgebiet 1 53 der 140 Gebäude zugeordnet werden (38%), sind es beim Indikator Gebäudekantenlänge nur 350 m von ca. 10,9 km Gesamtlänge (3%). Die Begründung dafür liegt in den vorwiegend punktuell auftretenden Wasserständen an Gebäudekanten in Modellgebiet 1.

In Modellgebiet 2 ist der Unterschied mit 327 Gebäuden in Klasse 2 bis 4 von 522 Gebäuden (63%) und 1.938 m von 11.262 m (17%) noch größer. Der Unterschied ist auf die sehr vielen punktuellen Wasserstände an den Gebäuden im Hangbereich zurückzuführen. Im Bereich der Talsohle stellt sich dagegen eine deutlich längere betroffene Kantenlänge je Gebäude ein.

Der Indikator Gebäudekantenlänge ist deutlich sensitiver einzuschätzen als die reine Gebäudeanzahl je Gefährdungsklasse. Für die Darstellung im Rahmen von Gefährdungskarten ist die betroffene Gebäudekantenlänge jedoch weniger geeignet, da die Einfärbung der Gebäude ein klareres Bild ergibt und sich so besser zur Darstellung der Überflutungsgefährdung eignet.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden beide Indikatoren betrachtet, um die Unterschiede zwischen den Modellansätzen sowohl hinsichtlich der Gefährdungsaussage als auch hinsichtlich der allgemeinen Modellsensitivität zu beleuchten.

Eine noch höhere Aussagekraft weist der Indikator „betroffene Gebäudewandfläche“ auf, da hier neben der betroffenen Gebäudekantenlänge auch noch der jeweilige Wasserstand an der Gebäudekante mit einfließt. Er liegt für Modellgebiet 1 bei 50 m<sup>2</sup>, für Modellgebiet 2 bei 710 m<sup>2</sup>.

In Tabelle 5-2 sind die Werte der Gefahrenindikatoren im Referenzzustand für die Modellgebiete 1 und 2 zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Werte der Gefahrenindikatoren im Referenzzustand Modellgebiete 1 und 2

		<b>MG 1 (flach/urban)</b>	<b>MG 2 (steil/ländlich)</b>
	GK1	82.400 (79,5%)	119.739 (91,2%)
Fläche nach Gefahrenklassen (Wasserstand) [m <sup>2</sup> ]	GK2	20.532 (19,9%)	5.300 (4,0%)
	GK3	558 (0,5%)	2.510 (1,9%)
	GK4	28 (<0,1%)	3.809 (2,9%)
	Summenindikator Gefahr (Wasserstand) [-]	21.842	21.747
	GK1	98.759 (95,4%)	124.183 (94,5%)
Fläche nach Gefahrenklassen (Fließgeschwindigkeit) [m <sup>2</sup> ]	GK2	4.610 (4,5%)	3.481 (2,7%)
	GK3	149 (0,1%)	3.181 (2,4%)
	GK4	0 (0%)	510 (0,4%)
	Summenindikator Gefahr (Fließgeschwindigkeit) [-]	4.959	10.232
Maximaler Wasserstand (h <sub>max</sub> )	[m]	1,59	1,85
Maximale Fließgeschwindigkeit (2D) (v <sub>max</sub> )	[m/s]	1,14	3,12
Maximale Wassermenge auf der Oberfläche (V <sub>max</sub> )	[m <sup>3</sup> ]	4.795	5.008
Zeit bis zur maximalen Wassermenge auf der Oberfläche	[min]	110 (75*)	51 (88**)

\* für Dauerstufe 120 min analog MG2

\*\*für Dauerstufe 240min analog MG1

Der Ergebnisvergleich zwischen den Modellgebieten lässt deutlich den Einfluss der unterschiedlichen topografischen Verhältnisse erkennen. Bei fast gleich großen maximalen Wassermengen auf der Oberfläche und gleich großen Werten des Summenindicators „wasserstandbedingte Überflutungsgefahr“ weist Modellgebiet 1 ein ausgedehnteres, jedoch von geringeren Wasserständen über Gelände geprägtes Überflutungsgeschehen auf (vgl. Flächenanteile Wasserstand GK 2 bzw. GK 3 und 4). Die höheren Flächenanteile bzgl. der Fließgeschwindigkeit in Modellgebiet 2 insbesondere in den höheren Klassen 3 und 4 sowie der Unterschied bei den Summenindikatoren lassen sich auf die steilere Topografie zurückführen.

Die Zeitpunkte an denen die maximalen Wassermengen auf der Oberfläche in den beiden Modellgebieten erreicht sind, lassen sich aufgrund der unterschiedlichen Dauerstufen der Niederschlagsbelastung nicht direkt vergleichen. Der relative Vergleich sowie Simulationen mit Ansatz gleicher Dauerstufen in beiden Gebieten zeigen aber, dass es in Modellgebiet 1 tendenziell später zum Erreichen der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche kommt als in Modellgebiet 2. Dieser Umstand ist auf die Lage von Modellgebiet 1 am Ende eines ca. 30 km<sup>2</sup> umfassenden Pumpwerkeinzugsgebietes zurückzuführen.

**Maximale Wassermenge auf der Oberfläche und Austausch an den Kopplungspunkten**

Abbildung 5-5 zeigt die Ganglinien der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche in den Modellgebieten 1 und 2. In Modellgebiet 2 ist der bilanzierte Bereich auf das Siedlungsgebiet begrenzt (Abgrenzung Siedlungsgebiet siehe Abbildung 5-3).

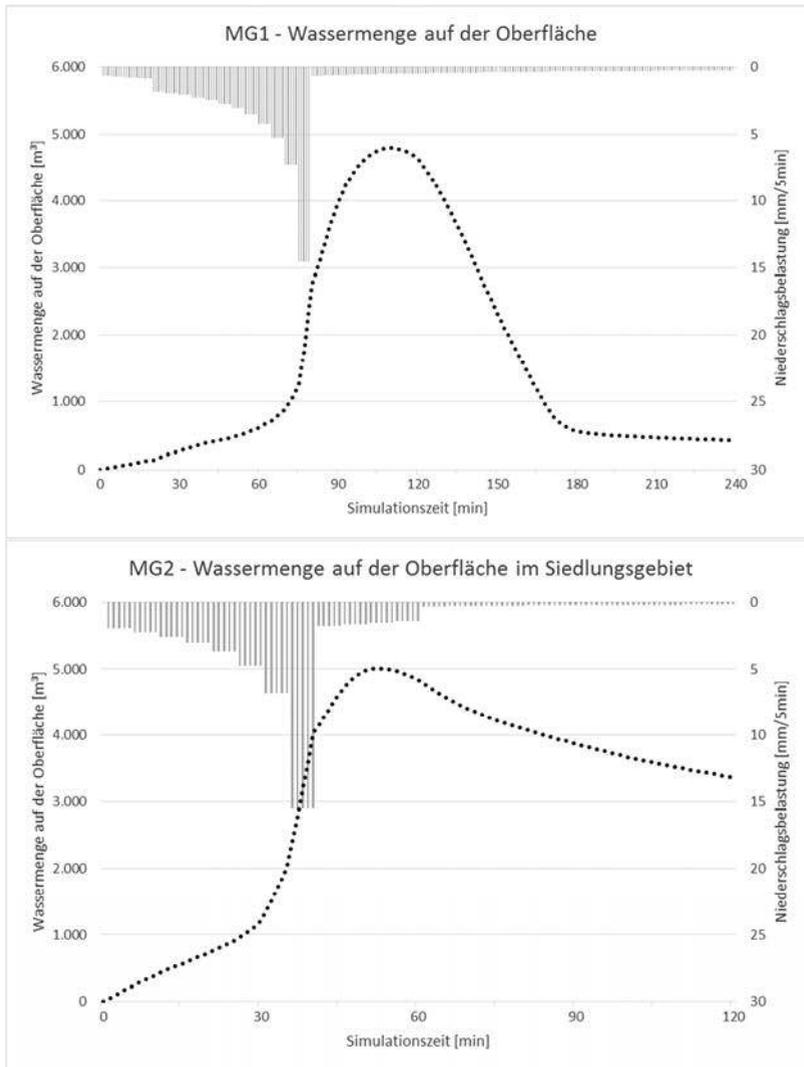


Abbildung 5-5: Ganglinien der Wassermenge auf der Oberfläche in Modellgebiet 1 (oben) und im Siedlungsgebiet von Modellgebiet 2 (unten)

Die Ganglinie von Modellgebiet 1 zeigt einen langsamen Anstieg bis zum Einsetzen der maximalen Intensität der Niederschlagsbelastung in Minute 76. Bis zu diesem Zeitpunkt ist das Kanalnetz noch nicht überlastet, Wasser sammelt sich nur in den Bereichen, wo kein Abfluss über einen Kopplungspunkt erfolgen kann. Von Minute 76 bis Minute 110 ist ein steiler Anstieg der Wassermenge auf der Oberfläche bis zum Maximum zu erkennen. Grund hierfür ist die beginnende Überlastung des Kanalnetzes ab Minute 72 die dann zeitlich mit der höchsten Intensität der Niederschlagsbelastung ab Minute 76 zusammenfällt. In den Bereichen in der Nähe von Kopplungspunkten kann das Oberflächenwasser nicht mehr dem nun überlasteten Kanalnetz zufließen. Gleichzeitig kommt es zu starkem Überstau aus dem Kanalnetz. Nach dem Peak in Minute 110 fällt das Volumen langsamer als es angestiegen ist bis Minute 180 wieder ab. Ab Minute 120 besteht die Überlastung des Kanalnetzes nicht mehr und das Wasser auf der Oberfläche kann dem Kanalnetz wieder über die Kopplungspunkte zufließen. Anschließend geht der Rückgang des Wassers auf der Oberfläche langsam von statten. Wasser in kleineren Vertiefungen ohne Verbindung zu Kopplungspunkten verlässt allmählich über den Versickerungsansatz das System.

Die Ganglinie von Modellgebiet 2 zeigt einen mäßigen Anstieg bis Minute 30. Es kommt zu ersten Wasserständen über Gelände im Bereich der Souterrainwohnungen in der Talsohle. Von Minute 30 bis Minute 51 ist ein sehr starker Anstieg bis zum Erreichen der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche zu verzeichnen. Es kommt zu starkem Überstau aus den Haltungen im Bereich der Talsohle sowie zu oberirdischem Abfluss in Richtung der Tieflage. Im Gegensatz zu Modellgebiet 1 fällt die Wassermenge auf der Oberfläche im restlichen Verlauf nur langsam ab, was auf die geringe Anzahl der Kopplungspunkte im Bereich der Flächen mit anstehendem Wasser in der Talsohle zurückzuführen ist, wobei es sich vorrangig um Schächte handelt.

Abbildung 5-6 zeigt in minutenscharfer Auflösung die Bilanz des ein- und austretenden Wassers an den Kopplungspunkten in den beiden Modellgebieten über die Zeit in Kubikmeter pro Minute. Blaumarkiert und positiv dargestellt ist die Summe des eintretenden Wassers (2D→1D), rotmarkiert und negativ dargestellt ist die Summe des austretenden Wassers (1D→2D). In jeweils unterschiedlich gestrichelten Linien sind die Anteile der drei verschiedenen Arten von Kopplungspunkten zu erkennen (Schächte, Straßenabläufe und Hofabläufe).

Bei Betrachtung der Ergebnisse für Modellgebiet 1 fallen drei Phasen auf. In Phase 1 bis ca. Minute 75 dominiert der Eintritt in das Kanalnetz und findet vorrangig über die Straßenabläufe statt. In Phase 2 von Minute 75 bis ca. Minute 120 ist der Kanaleintritt aufgrund der weitgehenden Überlastung des Kanalnetzes stark verringert und es kommt zu starkem Kanalüberstau mit austretendem Wasser. Der Kanalaustritt erfolgt in einem Verhältnis von ca. 2/3 zu 1/3 über Straßenabläufe und Schächte. Nur ein geringer Anteil fällt dabei den Hofabläufen zu. Der Anteil der Schächte am Kanalaustritt liegt somit deutlich höher als der Anteil der Schächte am Kanaleintritt. In Phase 3 ab Minute 120 schlägt die Situation um. Der Kanalaustritt nimmt ab und der Kanaleintritt nimmt wieder zu. Das Kanalnetz verfügt wieder über Kapazität und das auf der Oberfläche aufgestaute Wasser fließt dem Kanalnetz vorrangig über die Straßenabläufe wieder zu.

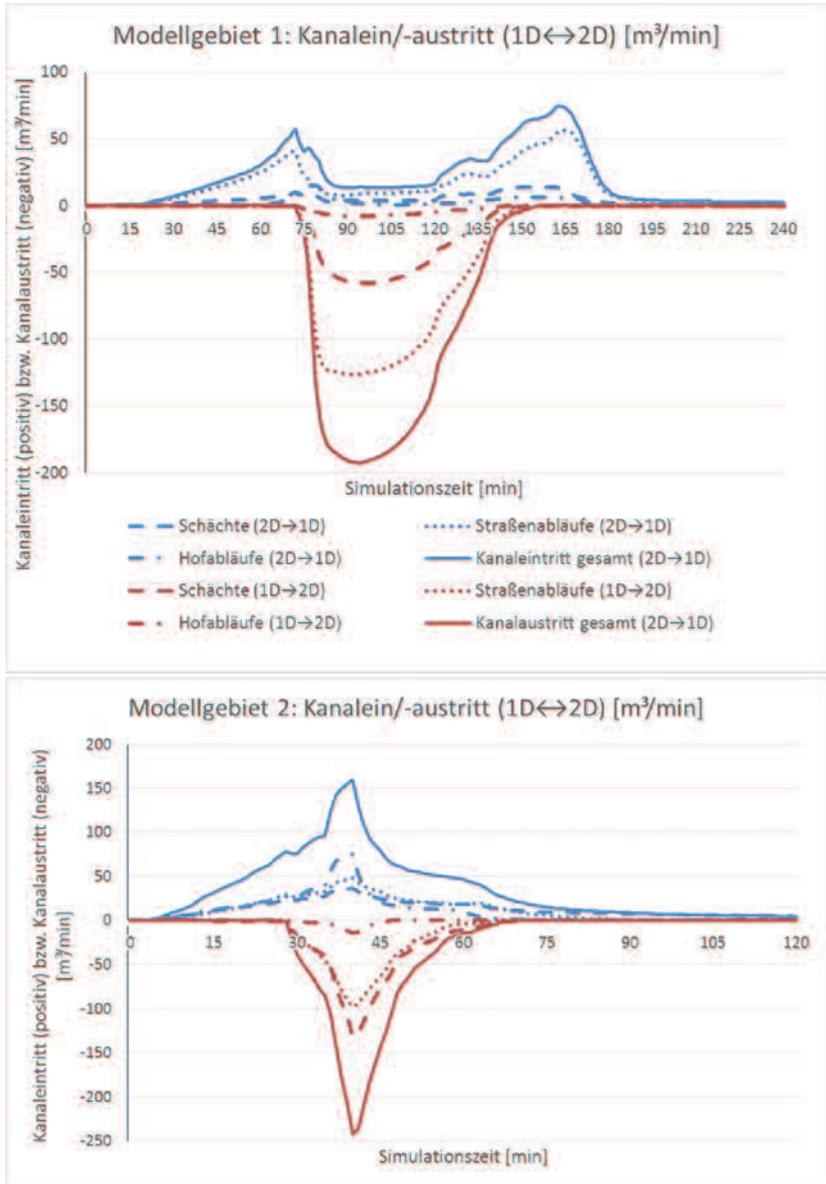


Abbildung 5-6: Ganglinien des Kanaleintritts bzw. -austritts in Modellgebiet 1 (oben) und im Siedlungsgebiet von Modellgebiet 2 (unten)

Für Modellgebiet 1 ist ein deutlicher zeitlicher Unterschied zwischen den Schwerpunkten von Kanaleintritt und -austritt erkennbar.

Die Ergebnisse von Modellgebiet 2 stellen sich davon stark abweichend dar. Der Kanaleintritt steigt bis Minute 30 nahezu linear an. Ein Kanalaustritt findet bis zu diesem Zeitpunkt nicht statt. Ab Minute 30 beginnt der Rückstau im Bereich der Talsohle und es kommt zu einem starken Anstieg des Kanalarückstaus bis zum Maximum in Minute 43. Der Kanalaustritt erfolgt zu fast gleichen Teilen über Schächte und Straßenabläufe. Auch der Kanaleintritt nimmt ab Minute 30 weiter zu. Bis Minute 35 ist der Anstieg durch die Überlastung im Bereich der Talsohle zunächst leicht gehemmt. Von Minute 35 bis 40 steigt der Kanaleintritt sprunghaft auf sein Maximum an. Grund hierfür ist der Anstieg des Eintritts über die Hofabläufe. Dieser erklärt sich durch den gesteigerten oberirdischen Abfluss im Bereich der Hanglage zum Zeitpunkt der höchsten Niederschlagsintensität, welcher vorrangig durch die Hofabläufe aufgefangen wird. Der vermehrte Eintritt in das Kanalnetz im Bereich der Hanglage führt mit geringer Verzögerung zu einem vermehrten Austritt aus dem Kanalnetz im Bereich der Talsohle. Der Kanalaustritt erreicht so mit geringer Verzögerung in Minute 43 sein Maximum. Nach Durchgang der maximalen Abflusswelle infolge der maximalen Niederschlagsintensität nimmt der Kanaleintritt, insbesondere der Anteil der Hofabläufe bis ca. Minute 47 rasant ab. Ab Minute 47 bleibt er aufgrund der Kapazitätserholung des Kanalnetzes zunächst nahezu konstant und nimmt dann mit Leerlaufen des Systems allmählich ab.

Der Vergleich der beiden Modellgebiete in Bezug auf das Austauschverhalten zwischen Kanalnetz und Oberfläche offenbart deutliche Unterschiede. Ist die Verteilung der Schwerpunkte von Kanaleintritt und –austritt bei Modellgebiet 1 eher zeitlich auf drei Phasen verteilt, so ist die Verteilung der Schwerpunkte bei Modellgebiet 2 eher räumlicher Natur (Eintritt in der Hanglage, Austritt in der Talsohle).

Die Summen und Bilanzen zum Kanaleintritt und –austritt sind in Tabelle 5-3, deren relative Verteilung auf die Kopplungspunkte sind in Abbildung 5-7 dargestellt. Auch in dieser Ergebnisdarstellung ist der Kanaleintritt positiv und der Kanalaustritt negativ dargestellt. Das Vorzeichen der jeweiligen Bilanzen zeigt somit an, ob über die Simulationsdauer in Summe mehr Wasser aus dem Kanalnetz ausgetreten (negatives Vorzeichen) oder eingetreten (positives Vorzeichen) ist.

Mit dem Fokus auf die Summen und Bilanzen zum Kanaleintritt und –austritt in Tabelle 5-3 und deren relative Verteilung in Abbildung 5-7 werden über die Betrachtung der Ganglinien hinaus Unterschiede bei der Rolle der verschiedenen Kopplungspunkte im Austauschprozess deutlich. So spielen beim Kanalaustritt in Modellgebiet 1 die Straßenabläufe eine deutlich größere Rolle als in Modellgebiet 2, bei dem das Verhältnis stärker zugunsten der Schächte verschoben ist. Beim Kanaleintritt sind es in Modellgebiet 1 wie beim Kanalaustritt die Straßenabläufe, die den Hauptanteil des Austauschs darstellen. In Modellgebiet 2 verteilen sich die Anteile der drei Arten von Kopplungspunkten am Kanaleintritt in etwa gleichmäßig. Der Kanaleintritt an den Schächten beschränkt sich jedoch hauptsächlich auf die Talsohle. Im Hangbereich erfolgt der Eintritt in der Hauptsache über Straßen- und Hofabläufe.

Tabelle 5-3: Summen und Bilanzen zu Kanaleintritt und –austritt für die Modellgebiete im Referenzzustand nach Arten der Kopplungspunkte und als Gesamtbilanz

		MG 1 (flach/urban)	MG 2 (steil/ländlich)
Schächte	1D→2D	-2.648	-1.639
	2D→1D	987	1.538
	Bilanz	-1.661	-101
Straßenabläufe	1D→2D	-6.207	-1.310
	2D→1D	3.531	1.443
	Bilanz	-2.676	133
Hofabläufe	1D→2D	-377	-98
	2D→1D	454	1.282
	Bilanz	77	1.184
Gesamt	1D→2D	-9.232	-3.047
	2D→1D	4.972	4.264
	Bilanz	-4.260	1.217

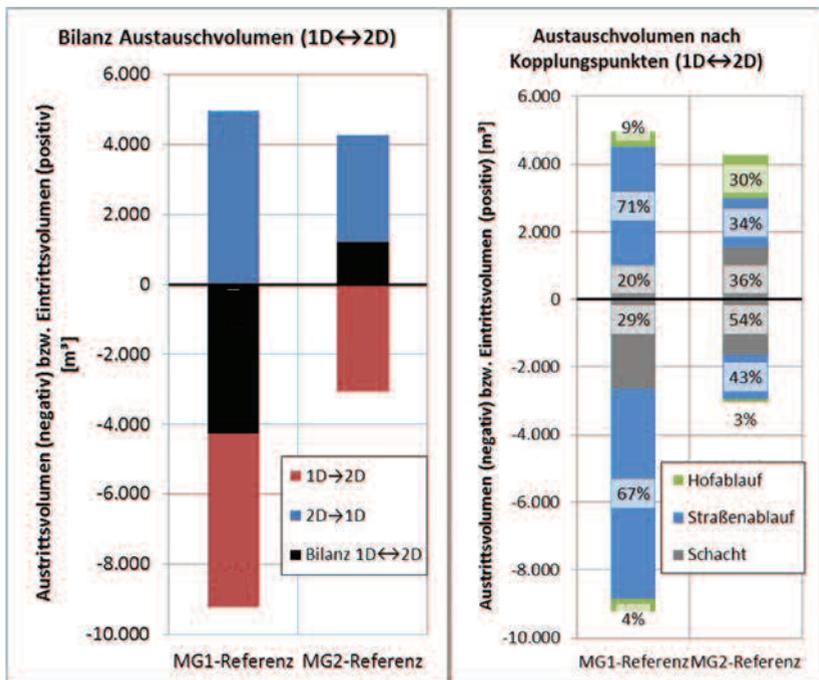


Abbildung 5-7: Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) in den Modellgebieten 1 und 2 für den Referenzzustand

In Modellgebiet 1 findet der Austausch an den Kopplungspunkten maßgeblich über die Straßenabläufe statt. In Modellgebiet 2 ist der Anteil der Schächte am Gesamtaustausch aufgrund höherer Wasserstände (Kanaleintritt), größerer Höhenunterschiede und Drücke (Kanalaustritt) höher als in Modellgebiet 1. Auffällig ist auch der im Vergleich bedeutendere Anteil der Hofabläufe am Kanaleintritt infolge der Fassung des Hangabflusses im Bereich der Hanglage. Das in der Modellierung ermöglichte Phänomen des Heraushebens der Schachtdeckel bei hohem Druck kommt in Modellgebiet 1 nicht vor. Grund hierfür ist zum einen die flache Topografie und zum anderen die Modellierung der Straßenabläufe, die durch ihre Lage in unmittelbarer Nähe zu den Schächten den Druck mindern. In Modellgebiet 2 kommt es dagegen bei mehreren Schächten in der Talsohle zu entsprechenden Drücken und hohem Wasseraustritt. Allgemein ist eine deutlich negative Bilanz des Kanalaustauschs in Modellgebiet 1 zu erkennen, was deutlich mehr austretendes Wasser als eintretendes Wasser anzeigt. Grund hierfür ist neben dem deutlich höheren Dachflächenanteil gegenüber Modellgebiet 2 der hohe unterirdische Zufluss zu Modellgebiet 1 aus dem umgebenden eindimensional berechneten Gebiet infolge der Lage am Endpunkte des gesamten Einzugsgebiet (siehe Kapitel 3.1.1).

## 5.2 Sensitivitätsanalyse zu den Modellvarianten

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Simulationsergebnisse für die Modellvarianten mit den Ergebnissen der Referenzmodelle in den beiden Gebieten verglichen. Dazu wird jeweils der Einfluss der Modellvarianten auf die in Kapitel 3 definierten Vergleichsindikatoren beschrieben, mit dem Referenzmodell verglichen und abschließend bewertet. Zur besseren Übersicht werden die Veränderungen im Modell zu Beginn des jeweiligen Unterkapitels kurz benannt.

In den Varianten wird die gleiche Niederschlagsbelastung wie für das Referenzmodell angesetzt.

### 5.2.1 Einfluss der Auflösung des Oberflächenmodells (Variante 1)

Wie in 4.4.1 beschrieben wird in dieser Variante 1 der Einfluss einer größeren Auflösung des 2D-Oberflächenmodells untersucht. Betrachtet wird der Einfluss einer Anhebung der maximalen Dreiecksgröße als Vorgabe für die Triangulation. In der Variante 1 wird in Modellgebiet 1 und im Siedlungsbereich von Modellgebiet 2 die maximale Dreiecksgröße von  $1 \text{ m}^2$  auf  $10 \text{ m}^2$  erhöht. Die maximale Dreiecksgröße im Außenbereich von Modellgebiet 2 bleibt im Vergleich zum Referenzmodell konstant bei  $20 \text{ m}^2$ . In 4.4.1 wurden die positiven Auswirkungen, die diese Veränderung des Referenzmodells u.a. auf die Rechenzeit hat, genannt. Im Folgenden werden die Veränderungen im Modell durch die Variante 1 beschrieben. Anschließend werden die Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse sowie auf die Gefahren- und auf die Gefährdungsaussage dargestellt und analysiert.

### Veränderungen im Modell durch die Variante 1

Durch die Verkleinerung der Auflösung des Oberflächenmodells wird die Geländeoberfläche des Modells verändert. Infolge der Vergrößerung des Dreiecksnetzes wird die den Dreiecken zugeordnete Geländehöhe aus mehreren Höheninformationen der Datengrundlage gemittelt. Dadurch kommt es im Vergleich zum Referenzmodell zu einem Glättungsvorgang, der sich in der in Abbildung 5-8 dargestellten Höhendifferenz zwischen den beiden Oberflächenmodellen (Referenz und Variante 1) niederschlägt.



Abbildung 5-8: Höhenunterschied zwischen den Oberflächenmodellen – Modellgebiet 1 – Referenzmodell/Variante 1. Rot: Variante 1 höher als Referenz, Grün: Referenz höher als Variante 1

Durch die parallelen Doppelbruchkanten zur Abbildung der Bordsteinkanten kommt es entsprechend dem Referenzmodell in deren Nähe auch in der Variante 1 zu ähnlichen Dreiecksgrößen. Daher fallen die Höhendifferenzen hier gering aus.

Im Bereich von kleinräumigen Vertiefungen und Erhöhungen oder steilem Gefälle kommt es infolge der Glättung in der Variante 1 zu deutlichen Unterschieden bezüglich der Geländeoberfläche zwischen den beiden Modellansätzen.

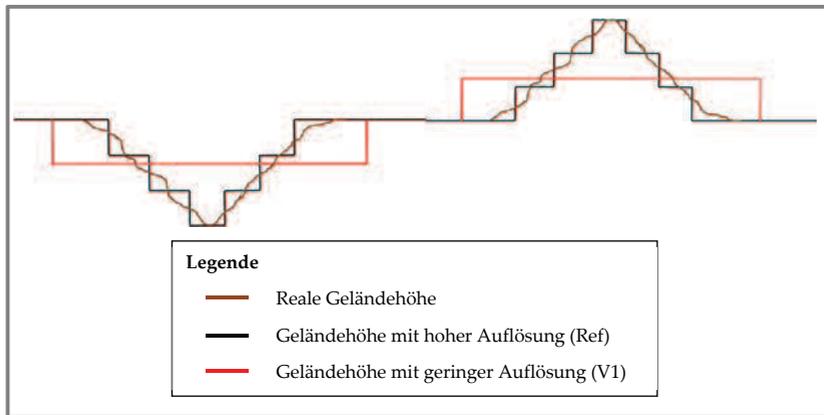


Abbildung 5-9: Schematische Darstellung der Abbildung von lokalen Vertiefungen (links) und Erhöhungen (rechts) bei unterschiedlicher Auflösung des Oberflächenmodells

Im Bereich eines Kellerzugangs in Modellgebiet 1 sowie im Bereich einer senkrecht zur Hangneigung verlaufenden Böschung in Modellgebiet 2 wird dies deutlich erkennbar (siehe Abbildung 5-10).

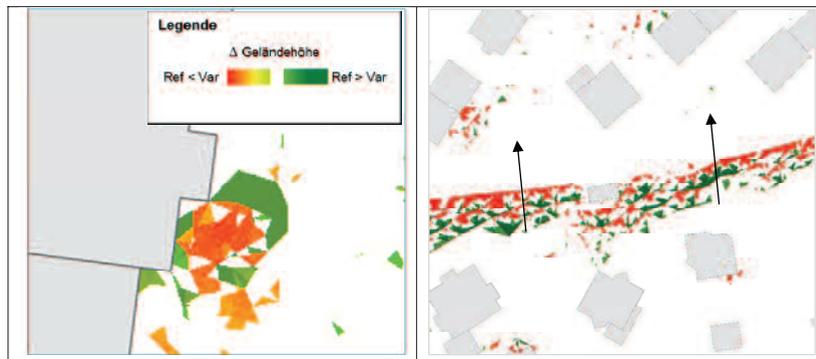


Abbildung 5-10: Höhenunterschied zwischen den Oberflächenmodellen – Tiefliegender Hauseingang in Modellgebiet 1 (links) und Böschung senkrecht zur Hangneigung in Modellgebiet 2 (rechts)

Im Bereich der Gebäudekanten kann die Veränderung in der Variante 1 von der Hangneigung im unmittelbaren Kantennbereich abhängen. So wird die Geländehöhe in Kantennähe bei in Richtung des Gebäudes abfallender Hangneigung durch die Glättung angehoben (Abbildung 5-11 links) und bei in Richtung des Gebäudes ansteigender Hangneigung abgesenkt (Abbildung 5-11 rechts). Entsprechend verkleinern bzw. vergrößern sich die Wasserstände in unmittelbarer Kantennähe. Dies führt zu einer direkten Beeinflussung der Indikatoren zur wasserstandbedingten Überflutungsgefährdung und damit zu einer entsprechenden Beeinflussung der Gefährdungsaussage.

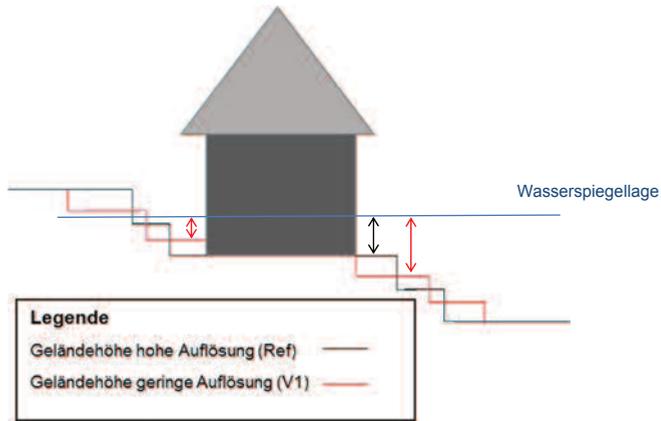


Abbildung 5-11: Schematische Darstellung der Geländehöhe im Gebäudekantenbereich bei unterschiedlichen Auflösungen des Oberflächenmodells

In unmittelbarer Entfernung zu den Gebäuden in Hanglage von Modellgebiet 2 befinden sich sehr häufig Vertiefungen in der Geländeoberfläche durch z.B. tiefliegende Gebäudezufahrten, Garagen, außenliegende Kellertreppen, Souterrainwohnungen und Lichtschächte. Diese sind im digitalen Geländemodell der Datengrundlage gut erfasst und werden mit der hohen Auflösung des Oberflächenmodells im Referenzmodell gut modelliert. Durch die gröbere Auflösung in Variante 1 wird das Oberflächenmodell in diesen Bereichen stark verändert und es kommt zu einer starken Beeinflussung der Gefährdungsaussage.

Zur Auswirkung der größeren Auflösung auf das Oberflächenmodell kann zusammengefasst werden, dass

- die gröbere Auflösung zu starken Veränderungen des Oberflächenmodells im Bereich der Gebäudekanten führt.
- die Art dieser Veränderungen stark vom individuellen Geländeprofil in unmittelbarer Gebäudenähe abhängt.
- in jedem Fall die Güte des Oberflächenmodells negativ beeinflusst wird und eine hohe direkte Auswirkung auf die Gefährdungsaussage zu erwarten ist.

In Summe ist in Modellgebiet 1 ein Abtrag von 24 m<sup>3</sup> im Vergleich zum Referenzzustand festzustellen. Es kommt also tendenziell eher zu einer Absenkung durch die Vergrößerung der Auflösung in der Triangulation als zu einer Anhebung. Grund ist das eher flache Geländeprofil von Modellgebiet 1 mit großen Flächen ähnlicher Höhe im Straßenraum. Die Straßenfläche weist im Straßenquerschnitt die geringste Geländehöhe und gleichzeitig den größten Flächenanteil auf. Bei einer Triangulation mit geringerer Auflösung werden Erhebungen (z.B. zwischen den Fahrbahnen und im Bordsteinbereich) geglättet, wodurch sich der leichte Abtragsüberschuss erklären lässt.

In Modellgebiet 2 ist in Summe ein Auftrag von 3.691 m<sup>3</sup> festzustellen. Grund hierfür sind die zahlreichen kleinräumigen Vertiefungen sowie die ausgedehnten tieferliegenden Souterrainbereiche in der Talsohle. Diese werden im Zuge des Glättungsvorgangs teilweise aufgefüllt.

### **Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche**

Die maximale Wassermenge auf der Oberfläche erhöht sich bei Variante 1 in Modellgebiet 1, während sie in Modellgebiet 2 zurückgeht (siehe Tabelle 5-4). Entsprechend verschiebt sich der Zeitpunkt der maximalen Wassermenge für Modellgebiet 1 nach hinten und für Modellgebiet 2 nach vorne.

Tabelle 5-4: Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 1 für beide Modellgebiete

		MG1		MG2	
		Ref	V1	Ref	V1
Maximale Wassermenge Oberfläche	[m <sup>3</sup> ]	4.795	5.304	5.008	4.817
			+ 10,6%		- 3,8%
Zeitpunkt maximale Wassermenge Oberfläche	[min]	110	114	52	51
			+ 3,6%		- 1,9%
Summenindikator Gefahr (Wasserstand)	[m <sup>2</sup> ×#GK]	21.842	24.559	21.747	22.394
			+ 12,4%		+ 3,0%
Summenindikator Gefährdung (Wasserstand)	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	54	61	573	564
			+ 13,0%		- 1,6%
Gebäudekantenlänge GK 2-4	[m]	350	640	1.938	2.165
			+ 82,9%		+ 11,7%
Betroffene Gebäudefläche	[m <sup>2</sup> ]	50	97	710	745
			+ 94,0%		+ 4,9%
Summenindikator Gefahr (Fließgeschwindigkeit)	[m <sup>2</sup> ×#GK]	4.959	5.104	10.232	9.153
			+ 2,9%		- 10,5%
Summenindikator Gefährdung (Fließgeschwindigkeit)	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	8	12	260	242
			+ 50,0%		- 6,9%

### **Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutunggefährdung**

Wie die Werte der Vergleichsindikatoren in Tabelle 5-4 zeigen, steigen in Modellgebiet 1 die Summenindikatoren Gefahr, Gefährdung sowie die betroffene Gebäudekantenlänge und Gebäudewandfläche an. Grund hierfür ist vor allem die Absenkung der Geländehöhen im Gebäudekantenbereich infolge Glättung.

In Modellgebiet 2 kommt es zu einem leichten Abfall der Indikatoren. Wie der Vergleich der Gefährdungskarten (siehe Anhang A.2.1 und A.2.3) zeigt, kommt es im Hangbereich bei vielen Gebäuden aus dem gleichen Grund wie in Modellgebiet 1 zu einem Anstieg der Gefährdung. Häufig verringert sich in Modellgebiet 2 aber

auch die Gefährdung aufgrund der oben beschriebenen Auffüllung von lokal begrenzten Tieflagen in Gebäudenähe. Die Gefährdungsaussage bleibt auf das Gesamtgebiet bezogen vergleichbar, die örtliche Verteilung der Gefährdung verändert sich jedoch sehr stark gegenüber dem Referenzmodell.

#### ***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsfährdung***

Der Summenindikator Gefahr aufgrund hoher Fließgeschwindigkeit verändert sich nur in geringem Maße. In Modellgebiet 1 nimmt er minimal zu, in Modellgebiet 2 leicht ab. Der Summenindikator Gefährdung hinsichtlich Fließgeschwindigkeit nimmt relativ gesehen in Modellgebiet 1 um 50% zu, in Modellgebiet 2 leicht ab. Die Zunahme der fließgeschwindigkeitsbedingten Gefährdung in Modellgebiet 1 resultiert wie bei den Wasserständen aus der Glättung in Gebäudekantennähe.

#### ***Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten***

Wie aus den Säulendiagrammen in Abbildung 5-12 ersichtlich, erhöht sich der Kanaleintritt in Modellgebiet 1 um 12% und der Kanalaustritt um 2%. Das Verhältnis des Anteils der Kopplungspunkte verschiebt sich beim Kanaleintritt leicht von den Straßenabläufen zu den Schächten. Beim Kanalaustritt bleibt das Verhältnis nahezu gleich. Grund für die Zunahme des Kanaleintritts ist die ebenfalls erhöhte Wassermenge auf der Oberfläche infolge der Absenkung im Straßenbereich.

Der Kanaleintritt nimmt in Modellgebiet 2 um 8%, der Kanalaustritt um 7% ab. Das Verhältnis des Anteils der Kopplungspunkte bleibt für Modellgebiet 2 vergleichbar zu dem des Referenzmodells. Die gröbere Auflösung hat somit auch auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten einen leichten Einfluss.

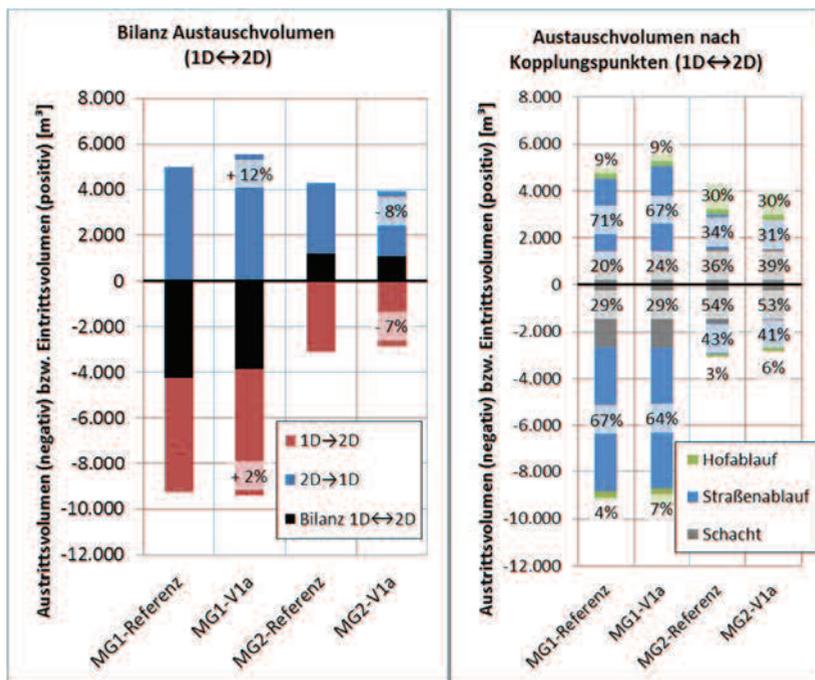


Abbildung 5-12: Bilanz des Austauschvolumens (links) und Austauschvolumen nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 1 in beiden Modellgebieten

### Bewertung

Auf die allgemeine Ausdehnung der Überflutungsflächen im Gesamtgebiet hat die gröbere Auflösung keine erhebliche Auswirkung. Bei einer straßen- bis flurstückscharfen Überflutungsbetrachtung, die in der Regel Gegenstand einer gekoppelten 1D/2D-Abflusssimulation ist, ergeben sich jedoch deutliche Einflüsse auf berechnete Wasserstände, Abflusswege und somit auf die abgeleitete Gefährdungsaussage. Der Einfluss einer gröberen Auflösung des Oberflächenmodells besteht in erster Linie in der Glättung der der Berechnung zugrundeliegenden Höheninformationen. Dies hat je nach den topografischen Gegebenheiten unterschiedliche Auswirkungen. Die lokal begrenzte topografische Variabilität, deren horizontale Ausdehnung sich in der Größenordnung der Auflösung des Geländemodells oder darunter bewegt, wird stark geglättet. Die Folge sind Veränderungen bei den berechneten Wasserständen. Dies führt im Gebäudebereich zu einer deutlichen Beeinflussung der Gefährdungsaussage.

Um dem Anspruch einer gebäudespezifischen Gefährdungsaussage gerecht werden zu können, sollte die Auflösung des Oberflächenmodells so gewählt werden, dass Kellertreppen und Lichtschächte von einer Glättung ausgenommen werden.

Vor diesem Hintergrund wird von der Unterschreitung einer Auflösung von mindestens einem Oberflächenelement pro Quadratmeter abgeraten.

Inwieweit sich die Ergebnisse des Referenzmodells von Berechnungen mit höherer Auflösung des Oberflächenmodells unterscheiden, sollte in weitergehenden Untersuchungen mit einer höher aufgelösten Datengrundlage untersucht werden, da diese hier nicht zur Verfügung stand.

Bei größeren Gebieten, deren hydrologisches Einzugsgebiet mit hoher Auflösung nicht berechenbar ist, muss eine Abwägung zwischen dem Fehler, der sich aufgrund einer geringeren Auflösung oder infolge der Durchführung von Teilgebietsbetrachtungen ergibt, getroffen werden. Bei weiter anhaltendem Anstieg der Rechen- und Speicherkapazitäten wird die Notwendigkeit einer größeren Auflösung in naher Zukunft voraussichtlich nicht mehr bestehen.

## 5.2.2 Einfluss der Abbildung des Kopplungspunktes (Variante 2)

In Variante 2 wird der Einfluss unterschiedlicher Modellierungsansätze des Kopplungspunktes untersucht.

### 5.2.2.1 Variante 2a: Keine Straßenabläufe, Schächte geöffnet

Straßenabläufe sind in der Regel nicht in bestehenden Kanalnetzmodellen implementiert und eine nachträgliche Aufnahme in die Modellierung kann einen großen Arbeitsaufwand bedeuten. Vielerorts liegt keine digitale Datengrundlage zu den Straßenabläufen vor. Diese muss erst erhoben werden. Dennoch werden in Gebieten, für die Kanalnetzmodelle ohne Straßenabläufe vorhanden sind, Überflutungssimulationen durchgeführt. In Variante 2a wird der Einfluss einer fehlenden Modellierung von Straßenabläufen auf die Simulationsergebnisse untersucht. Dazu werden die Straßenabläufe aus dem Modell entfernt und gleichzeitig die Schächte als offen angesetzt (siehe Kapitel 4.4.2). Um eventuelle Effektüberlagerungen zu vermeiden, bleiben die Hofabläufe im Modell implementiert, auch wenn nicht davon auszugehen ist, dass in der Praxis Hofabläufe, jedoch keine Straßenabläufe modelliert werden.

### Veränderungen im Modell durch die Variante 2a

In Modellgebiet 1 werden 127 Straßenabläufe, in Modellgebiet 2 werden 144 Straßenabläufe entfernt. Die Schächte werden als offen (ohne Schachtdeckel) angesetzt. Der hydraulische Zusammenhang wird über die Überfall- bzw. die Energieformel abgebildet.

### ***Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten***

Durch die Entfernung der Straßenabläufe aus den Modellen kommt es trotz gleichzeitiger Öffnung der Schächte in Modellgebiet 1 zu einem starken Abfall des Kanaleintritts um 22%. Dennoch wird ein großer Teil des Kanaleintritts, der im Referenzmodell über die Straßenabläufe stattgefunden hat, kompensiert. Dies geschieht fast ausschließlich über die Schächte. Der Kanalaustritt steigt in Modellgebiet 1 minimal an. Der komplette Anteil der Straßenabläufe wird beim Kanalaustritt durch die Schächte kompensiert.

In Modellgebiet 2 steigt in Variante 2a der Kanaleintritt um 30 % an. Zwar fallen die Straßenabläufe für den Kanaleintritt weg, durch die Öffnung der Schächte im Modell wird der Wegfall jedoch überkompensiert. Besonders im Bereich der westlichen Talsohle erhöht sich der Kanaleintritt an den Schächten. Dies zeigt sich hier auch in den geringeren maximalen Wasserständen. Der Kanalaustritt an den Straßenabläufen wird durch die Schächte kompensiert und erhöht sich ebenfalls leicht.

Der Vergleich der Modellgebiete zeigt, dass die Kompensation der fehlenden Straßenabläufe über die Schächte unzureichend ist bzw. zu größeren Ungenauigkeiten in der Simulation führt. In Modellgebiet 1 wird beim Kanaleintritt unterkompensiert, in Modellgebiet 2 überkompensiert. In Modellgebiet 2 kommt es, zusätzlich zur ungleichen Bilanz, zu einer lokalen Verlagerung. Der Oberflächenabfluss, der im Referenzmodell in der Hanglage durch die Straßenabläufe gefasst wird, fließt in der Variante 2a der Talsohle oberirdisch zu und tritt dort verstärkt über die geöffneten Schächte in das Kanalnetz ein.

Während eine Angleichung der Austauschbilanz durch Kalibrierung der Öffnungsweite der Schächte theoretisch vorstellbar ist, bleibt der Sachverhalt der lokalen Verlagerung infolge des Wegfalls der Straßenabläufe bestehen.

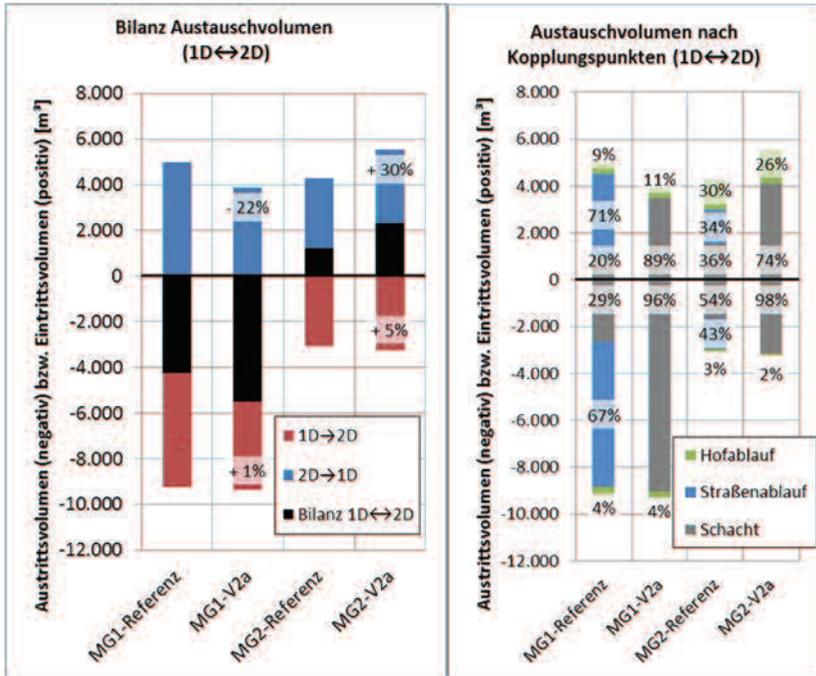


Abbildung 5-13: Bilanz des Austauschvolumens (links) und Austauschvolumen nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 2a in beiden Modellgebieten

### ***Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche***

Die Werte der Vergleichsindikatoren verändern sich kaum (siehe Tabelle 5-5). Die maximale Wassermenge auf der Oberfläche nimmt in Modellgebiet 1 minimal zu und in Modellgebiet 2 nimmt sie minimal ab. Der Zeitpunkt der maximalen Überflutung verschiebt sich in Modellgebiet 1 durch den intensiveren Kanalaustritt um 4 Minuten nach vorne, in Modellgebiet 2 bleibt er gleich.

### ***Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutunggefährdung***

Der Summenindikator zur wasserstandbezogenen Gefahr nimmt in beiden Modellgebieten minimal zu. Der Gefährdungsindikator verändert sich für beide Modellgebiete quasi nicht. Die betroffenen Gebäudekantenlänge und Gebäudewandfläche nimmt in Modellgebiet 1 leicht ab, in Modellgebiet 2 minimal zu.

Tabelle 5-5: Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 2a für beide Modellgebiete

		MG1		MG2	
		Ref	V2a	Ref	V2a
<b>Maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[m <sup>3</sup> ]	4.795	4.866	5.008	4.912
			+ 1,5%		- 1,9%
<b>Zeitpunkt maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[min]	110	106	52	52
			- 3,6%		+ 0,0%
<b>Summenindikator Gefahr (Wasserstand)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	21.842	22.278	21.747	22.011
			+ 2,0%		+ 1,2%
<b>Summenindikator Gefährdung (Wasserstand)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	54	54	573	568
			+ 0,0%		- 0,9%
<b>Gebäudekantenlänge GK 2-4</b>	[m]	350	327	1.938	1.946
			- 6,6%		+ 0,4%
<b>Betroffene Gebäudefläche</b>	[m <sup>2</sup> ]	50	47	710	710
			- 6,0%		+ 0,0%
<b>Summenindikator Gefahr (Fließgeschwindigkeit)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	4.959	4.721	10.232	10.018
			- 4,8%		- 2,1%
<b>Summenindikator Gefährdung (Fließgeschwindigkeit)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	8	8	260	256
			+ 0,0%		- 1,5%

Der Vergleich der Gefährdungskarten (siehe Anhang A.1.1 und A.1.5) zeigt durch den intensiveren Kanalaustritt an den geöffneten Schächten für Modellgebiet 1 einen leichten Anstieg der maximalen Wasserstände im Straßenraum. Gleichzeitig nehmen die maximalen Wasserstände in den Hofbereichen infolge des geringeren Überstau durch die Hofabläufe bei geöffneten Schächten leicht ab.

In Modellgebiet 2 nehmen die Wasserstände im westlichen Teil der Talsohle infolge der geöffneten Schächte ab, während sie im nordöstlichen Teil der Talsohle zunehmen. Den Straßenraum in den senkrecht zur Hangneigung verlaufenden Straßen der Hanglage betreffend, kommt es infolge des Wegfalls der Straßenabläufe vereinzelt zu höheren Wasserständen.

### ***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Der Summenindikator fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr nimmt in beiden Gebieten leicht ab. Die fließgeschwindigkeitsbedingte Gefährdung verändert sich kaum.

### **Bewertung**

Auch wenn die Summenindikatoren kaum Veränderung für die Gesamtgebiete aufweisen, zeigt der Vergleich der Gefährdungskarten starke örtliche Verlagerungen der Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung. In Modellgebiet 1 begründet sich dies hauptsächlich durch zunehmende Wasserstände im Straßenraum, die sich durch einen intensiveren Kanalausstritt über die geöffneten Schächte und einen geminderten Kanaleintritt von in der Fläche verteiltem Oberflächenwasser aufgrund der fehlenden Straßenabläufe erklären. In Modellgebiet 2 begründet sich dies durch den vergrößerten Oberflächenabfluss im Hangbereich und den erhöhten Kanaleintritt über die offenen Schächte in der Talsohle.

Der Kompensationsansatz fehlender Straßenabläufe durch offene Schächte ist fragwürdig, da er zu stark abweichenden Ergebnissen in beiden Modellgebieten führt und eine örtliche Verlagerung des Kanaleintritts und Kanalaustritts nicht verhindert.

#### **5.2.2.2 Variante 2b: Keine Hofabläufe**

In der Regel sind keine Daten zu Art und Lage von Hofabläufen und ihrer Anschlussleitungen verfügbar. Den Entwässerungsbetrieben liegen im besten Fall Daten zur Lage von Anschlussstellen entlang der Haltung vor. Insbesondere für die Bebauungssituation, entsprechend Modellgebiet 1 (Blockrandbebauung), existiert in der Realität zweifelsohne eine Vielzahl an Hofabläufen. Auch in Modellgebiet 2 kann aufgrund der bewegten Topografie und der vielen Geländetiefpunkte auf den Grundstücken sowie in den Bereichen mit Souterrainwohnungen eine große Zahl an Hofabläufen unterstellt werden. Ihr Einfluss auf die Entwässerungssituation im überflutungsrelevanten Starkregenfall ist voraussichtlich nicht zu vernachlässigen. Aus dieser Annahme heraus wurden im Referenzmodell Hofabläufe modelliert. Wie sehr deren Modellierung Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben kann, soll in Variante 2b untersucht werden. Hier wurde die Implementierung der Hofabläufe zurückgenommen. Idealerweise sollten zukünftig Untersuchungen mit abgesicherten Informationen zu den Hofabläufen durchgeführt werden.

#### **Veränderungen im Modell durch die Variante 2b**

Die Hofabläufe werden mitsamt ihrer Anschlussleitungen aus dem Modell entfernt. Die übrigen Modellkonfigurationen werden entsprechend der Referenzkonfiguration beibehalten.

#### **Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten**

Wie aus den Säulendiagrammen in Abbildung 5-14 ersichtlich ist, verringert sich der Kanaleintritt und Kanalausstritt in beiden Gebieten. In Modellgebiet 2 ist die Abnahme deutlich größer als in Modellgebiet 1. In Modellgebiet 2 tragen die Hofabläufe im Referenzmodell maßgebend zum Kanaleintritt bei (30%). Der Blick

auf die Anteile der Kopplungspunkte am gesamten Austauschvolumen (Abbildung 5-14 rechts) macht deutlich, dass der Anteil der Hofabläufe in Modellgebiet 1 ersatzlos entfällt. In Modellgebiet 2 wird der wegfallende Kanaleintritt der Hofabläufe teilweise durch Straßenabläufe und Schächte kompensiert. Der Kanalausstritt reduziert sich sogar noch über den Anteil der Hofabläufe hinaus. Dieser Umstand ist hier auf die verringerte Kanalauslastung infolge des geringeren Kanaleintritts zurückzuführen.

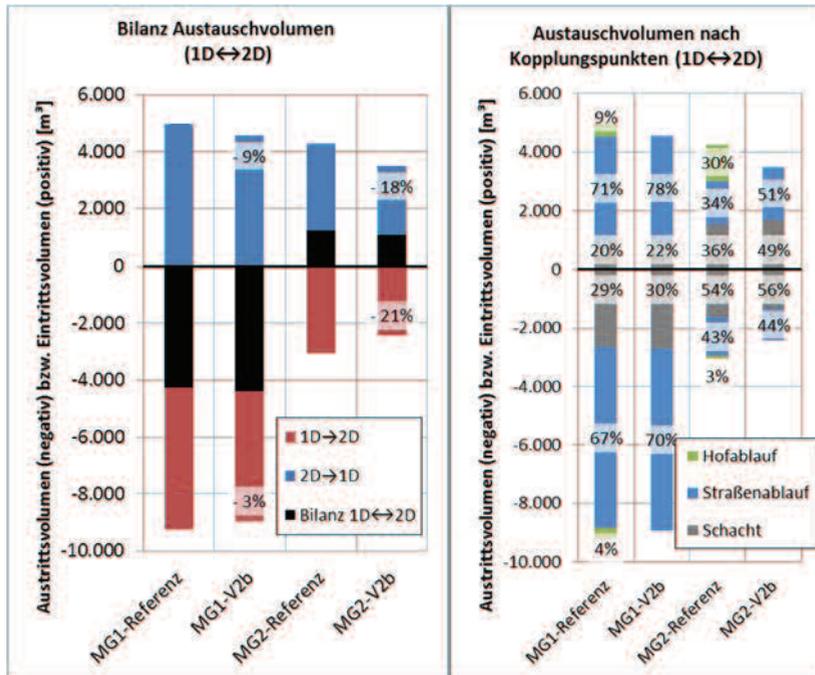


Abbildung 5-14: Bilanz des Austauschvolumens (links) und Austauschvolumen nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 2b in beiden Modellgebieten

### ***Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche***

Die maximale Wassermenge auf der Oberfläche nimmt in Modellgebiet 1 minimal zu, in Modellgebiet 2 leicht zu (Tabelle 5-6). Der Zeitpunkt der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche verschiebt sich in Modellgebiet 1 zeitlich um 1 Minute nach vorne, in Modellgebiet 2 um 1 Minute nach hinten, weist also eine sehr geringe Auswirkung auf.

Tabelle 5-6: Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 2b für beide Modellgebiete

		MG1		MG2	
		Ref	V2b	Ref	V2b
<b>Maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[m <sup>3</sup> ]	4.795	4.807	5.008	5.332
			+ 0,2%		+ 6,5%
<b>Zeitpunkt maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[min]	110	109	52	53
			- 0,9%		+ 1,9%
<b>Summenindikator Gefahr (Wasserstand)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	21.842	21.443	21.747	23.153
			- 1,8%		+ 6,5%
<b>Summenindikator Gefährdung (Wasserstand)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	54	58	573	659
			+ 7,4%		+ 15,0%
<b>Gebäudekantenlänge GK 2-4</b>	[m]	350	320	1.938	2.230
			- 8,6%		+ 15,1%
<b>Betroffene Gebäudefläche</b>	[m <sup>2</sup> ]	50	43	710	854
			- 14,0%		+ 20,3%
<b>Summenindikator Gefahr (Fließgeschwindigkeit)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	4.959	4.904	10.232	10.201
			- 1,1%		- 0,3%
<b>Summenindikator Gefährdung (Fließgeschwindigkeit)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	8	8	260	265
			+ 0,0%		+ 1,9%

### ***Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Der Vergleich der Gefährdungskarten (siehe Anhang A.1.1 und A.1.7) zeigt für Modellgebiet 1 sowohl Zu- als auch Abnahmen der Wasserstände in den Hofbereichen. Zwei Phänomene sind dafür verantwortlich:

- In ausgedehnten und nicht rückstaubelasteten Hofbereichen kommt es zu einem leichten Anstieg der Wasserstände durch die entfallende Entwässerungsmöglichkeit über die Hofabläufe.
- In kleineren und rückstaubehafteten Bereichen kommt es zu geringeren Wasserständen, da der Überstau aus dem Kanalnetz in den Hofbereich entfällt.

Hinsichtlich der Aussage zu Gefahr und Gefährdung ist eine minimale Abnahme der Fläche mit Überflutungsgefahr bei gleichzeitig leicht ansteigender Gefährdung zu verzeichnen (siehe Tabelle 5-6).

In Modellgebiet 2 kommt es kaum zu einer Veränderung im Bereich der Talsohle. Deutliche Veränderungen sind jedoch im Bereich der Hanglage erkennbar. Hier kommt es an sehr vielen Gebäuden zu erhöhten Wasserständen. Diese stellen sich fast ausschließlich in Hangneigungsrichtung vor den Gebäuden ein. Entsprechend ergibt sich ein leichter Anstieg des Summenindicators Gefahr und ein starker Anstieg des Summenindicators Gefährdung. Auch die betroffene Gebäudekantenlänge und, noch stärker, die Gebäudewandfläche erhöhen sich deutlich.

### ***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Ein nennenswerter Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung ist nicht feststellbar.

### ***Bewertung***

Die Modellierung von Hofabläufen hat großen Einfluss auf die Situation in den Hofbereichen. Dieser Einfluss kann sich sowohl entschärfend als auch verschärfend auf die Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung auswirken. In steilen Gebieten werden durch Hofabläufe hohe Wasserstände an der Hangseite der Gebäude verhindert. In flachen Gebieten mit Kanalarückstau werden kanalinduzierte Überflutungen der Hoffläche dargestellt. Der Einfluss auf die gebietsweite Gefährdungsaussage ist in dieser Betrachtung für Modellgebiet 2 sehr deutlich, für Modellgebiet 1 eher gering. Die objektspezifische Gefährdung wird durch die Modellierung der Hofabläufe stark beeinflusst.

Zur Ableitung einer eindeutigen Anwendungsempfehlung sind weitergehende Untersuchungen mit abgesicherten Informationen zu Anzahl, Art und Lage von Hofabläufen notwendig.

#### ***5.2.2.3 Variante 2c: Keine Hofabläufe, Hofflächenabfluss 1D***

Eine weitere Möglichkeit mit der Unsicherheit zur Hofflächenentwässerung umzugehen ist diese nicht über Kopplungspunkte zu modellieren, sondern den Abfluss der Hofflächen direkt dem Kanalnetzmodell zuzugeben, wie es im Referenzmodell ebenfalls mit den Dachflächen gehandhabt wird. Die Untersuchung des Einflusses dieses Ansatzes ist Gegenstand der Variantenbetrachtung 2c.

### ***Veränderungen im Modell durch die Variante 2c***

Gegenüber dem Referenzmodell werden die Hofabläufe entfernt. Im Bereich der Hofflächen wird keine direkte Berechnung des 2D-Oberflächenmodells angesetzt. Die Abflüsse der Hofflächen werden entsprechend dem konventionellen Ansatz direkt dem Kanalnetzmodell zugegeben. Die Hofflächen werden aber dennoch im 2D-Modell abgebildet, sodass ein oberflächiger Abfluss hier weiterhin möglich ist.

### ***Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten***

In beiden Modellgebieten reduziert sich der Kanaleintritt (Abbildung 5-15). Grund hierfür ist die direkte Zugabe des Hofflächenabflusses in das Kanalnetzmodell mit der Konsequenz, dass dieser am Kopplungspunkt nicht bilanziert wird.

In Modellgebiet 1 reduziert sich der Kanaleintritt leicht. Die Reduzierung entspricht in etwa dem Anteil der Hofabläufe im Referenzzustand. In Modellgebiet 2 kommt es zu einer deutlichen Reduzierung des Kanaleintritts um etwa die Hälfte.

Die Erklärung für die Diskrepanz zwischen den Modellgebieten hinsichtlich dieser Reduzierung liegt in dem Umstand, dass in Modellgebiet 1 im Referenzzustand kaum Hofflächenabfluss anderen Kopplungspunkten als den Hofabläufen zugeflossen ist. In Modellgebiet 2 kommt es dagegen im Referenzzustand aufgrund der ausgeprägten Hangneigung zu deutlichen Zuflüssen von den Hofflächen zu Straßenabläufen und Schächten sowie in die Talsenke. In der Variante 2c fällt dieser oberirdische Zufluss weg, da er direkt dem Kanalnetzmodell zugeordnet wird.

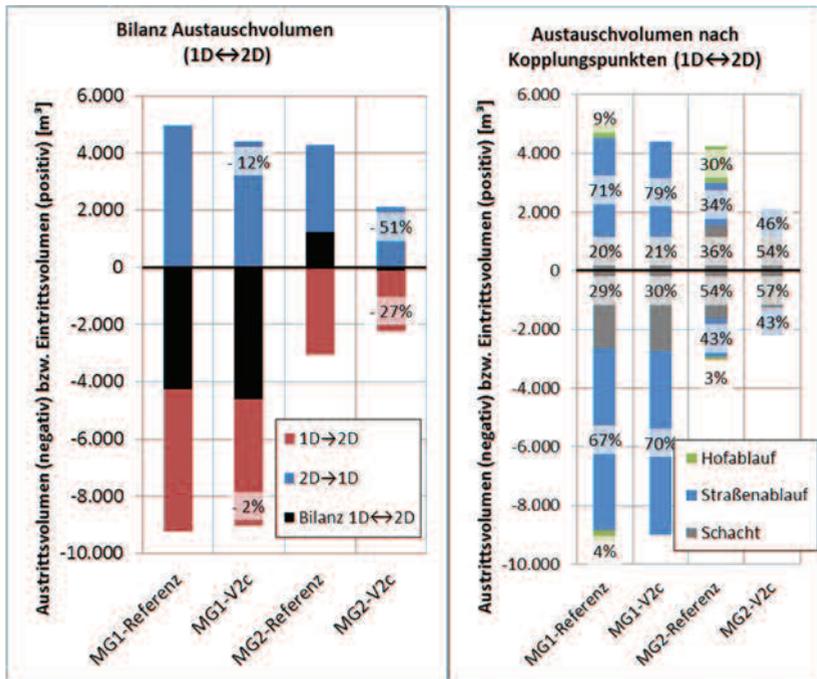


Abbildung 5-15: Bilanz des Austauschvolumens (links) und Austauschvolumen nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 2c in beiden Modellgebieten

### **Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche**

Entsprechend der vorstehend beschriebenen Beobachtung nimmt die maximale Wassermenge auf der Oberfläche in Modellgebiet 1 deutlich und in Modellgebiet 2 sehr stark ab (Tabelle 5-7). Der Zeitpunkt der maximalen Überflutung verschiebt sich in Modellgebiet 1 um 1 Minute, in Modellgebiet 2 um 8 Minuten nach hinten.

### **Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung**

Die Reduzierung des Summenindikators „wasserstandbedingte Gefahr“ bewegt sich in ähnlicher Relation wie die der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche.

Der Vergleich der Gefährdungskarten (siehe Anhang A.1.1 und A.1.9) zeigt, dass in Modellgebiet 1 keinerlei Wasserstände im Hofbereich zu verzeichnen sind. Dies ist die logische Konsequenz aus fehlender direkter Beregnung und fehlendem Kanalarückstau in die Hoffläche infolge entfernter Hofabläufe. Die Zunahme der Wasserstände im Straßenraum ist lediglich minimal. In Modellgebiet 2 reduziert sich der oberirdische Abfluss deutlich. Infolgedessen reduziert sich auch der oberirdische Zufluss in die Talsenke, was dort zu starken Wasserstandreduzierungen führt.

Die Gefährdungsindikatoren reduzieren sich drastisch. Dies ist besonders in Modellgebiet 1 der Fall, da alle gefährdungsinduzierenden Wasserstände aus den Hofbereichen verschwinden. In Modellgebiet 2 nimmt die Gefährdung sowohl in der Hanglage als auch in der Talsenke ab.

Tabelle 5-7: Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 2c für beide Modellgebiete

		MG1		MG2	
		Ref	V2c	Ref	V2c
<b>Maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[m <sup>3</sup> ]	4.795	4.213	5.008	3.345
			- 12,1%		- 33,2%
<b>Zeitpunkt maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[min]	110	111	52	60
			+ 0,9%		+ 15,4%
<b>Summenindikator Gefahr (Wasserstand)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	21.842	19.626	21.747	15.056
			- 10,1%		- 30,8%
<b>Summenindikator Gefährdung (Wasserstand)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	54	15	573	392
			- 72,2%		- 31,6%
<b>Gebäudekantenlänge GK 2-4</b>	[m]	350	119	1.938	1.182
			- 66,0%		- 39,0%
<b>Betroffene Gebäudefläche</b>	[m <sup>2</sup> ]	50	16	710	431
			- 68,0%		- 39,3%
<b>Summenindikator Gefahr (Fließgeschwindigkeit)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	4.959	4.669	10.232	6.653
			- 5,8%		- 35,0%
<b>Summenindikator Gefährdung (Fließgeschwindigkeit)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	8	7	260	155
			- 12,5%		- 40,4%

### ***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Die Summenindikatoren zur Fließgeschwindigkeit werden ebenfalls reduziert. Weit deutlicher ist die Reduzierung in Modellgebiet 2, in dem der stark abnehmende Hangabfluss auch zu einer Reduzierung der Fließgeschwindigkeiten führt.

## **Bewertung**

Die Variante 2c führt bzgl. der 2D-Betrachtung im flachen Modellgebiet 1 zu einem völligen Ausklammern der Hofbereiche. Kanalüberstau in den Hofbereich wird nicht modelliert. Im steileren Modellgebiet 2 wird der Hangabfluss stark reduziert. Ob die direkte Zugabe des kompletten Hofflächenabfluss an das Kanalnetzmodell im außergewöhnlichen Starkregenfall einen realitätsnahen Ansatz für steile Hanglagen darstellt ist fraglich, auch weil die Unterschiede zum Ansatz des Referenzmodells sowohl hinsichtlich der gebietsweiten als auch hinsichtlich der objektspezifischen Gefahren- und Gefährdungsaussage drastisch sind.

Der Modellansatz zur Modellierung des Abflusses von Hofflächen zeigt in dieser Betrachtung einen sehr hohen Einfluss auf die Ergebnisse und die abgeleiteten Aussagen. Gleichzeitig ist die Datenlage zu Anzahl, Art und Lage von Hofabläufen im Allgemeinen eher schlecht. Der Ansatz mit Modellierung von Hofabläufen, wie er im Referenzmodell gewählt wurde, basiert auf groben Annahmen zu Anzahl, Art und Lage von Hofabläufen. Zur Ableitung einer eindeutigen Empfehlung werden dringend Betrachtungen mit abgesicherten Informationen zu den Hofabläufen als notwendig erachtet.

### **5.2.3 Einfluss des hydraulischen Ansatzes zur Kopplung 1D/2D (Variante 3)**

#### **5.2.3.1 Variante 3a: konventionell (Wehrüberfall/Energieformel)**

In Variante 3a wird der sehr differenzierte und auf aktuellen Laboruntersuchungen in MKULNV NRW (2016) basierende hydraulische Ansatz zur Kopplung an den Straßenabläufen zurückgenommen und die Kopplung, wie in 4.4.3 beschrieben, über den konventionellen Ansatz mit der Wehrüberfallformel abgebildet. Auch an den Schächten und Hofabläufen wird der konventionelle, im Programm hinterlegte hydraulische Ansatz angewendet (siehe Kapitel 4.4.3).

#### **Veränderungen im Modell durch die Variante 3a**

Gegenüber dem Referenzmodell werden die hydraulischen Ansätze an den Kopplungspunkten, wie in 4.4.3 beschrieben, verändert. Abbildung 5-16 zeigt die veränderte Q-H-Beziehung an Straßenabläufen und Hofabläufen im Vergleich zum Referenzmodell. Wie im Diagramm erkennbar, ist der Kanaleintritt bis zu einem Wasserstand von ca. 16 cm im Referenzmodell höher als in der Variante 3a. Bei höheren Wasserständen erhöht sich der Kanaleintritt in der Variante 3a deutlich gegenüber dem Referenzmodell. Der Kanalaustritt erhöht sich mit zunehmendem Druckunterschied in der Variante 3a deutlich stärker als im Referenzmodell (siehe auch Gesamtübersicht in Abbildung 5-18).

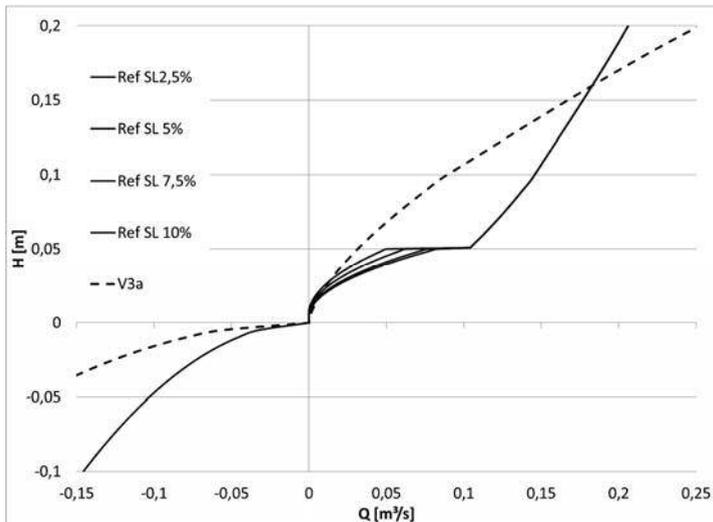


Abbildung 5-16: Veränderte Q-H-Beziehung an den Straßen- und Hofabläufen in V3a im Vergleich zum Referenzmodell (negative Werte: Kanalaustritt, positive Werte: Kanaleintritt)

Abbildung 5-17 zeigt die veränderte Q-H-Beziehung an den Schächten im Vergleich zum Referenzmodell. Beim Kanalaustritt entfällt gegenüber dem Referenzmodell die Modellierung des abhebenden Kanaldeckels. Beim Kanaleintritt bewirkt der Ansatz der Überfallformel in der Variante 3a bis zu einem Wasserstand von 6 cm einen geringeren Kanalaustritt. Ab 6 cm Wasserstand nimmt der Kanaleintritt gegenüber dem Referenzmodell deutlich zu (siehe auch Gesamtübersicht in Abbildung 5-18).

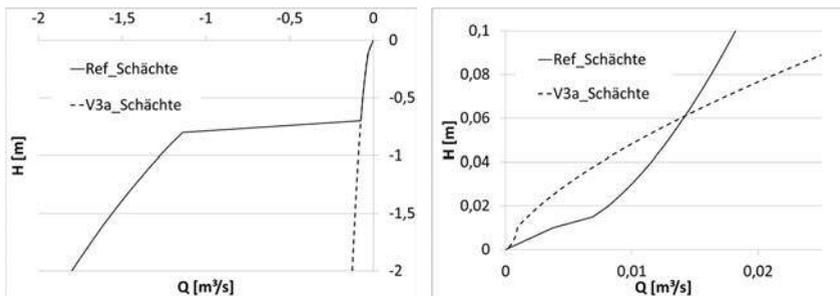


Abbildung 5-17: Veränderte Q-H-Beziehung an den Schächten in V3a im Vergleich zum Referenzmodell (links: Kanalaustritt, rechts: Kanaleintritt)

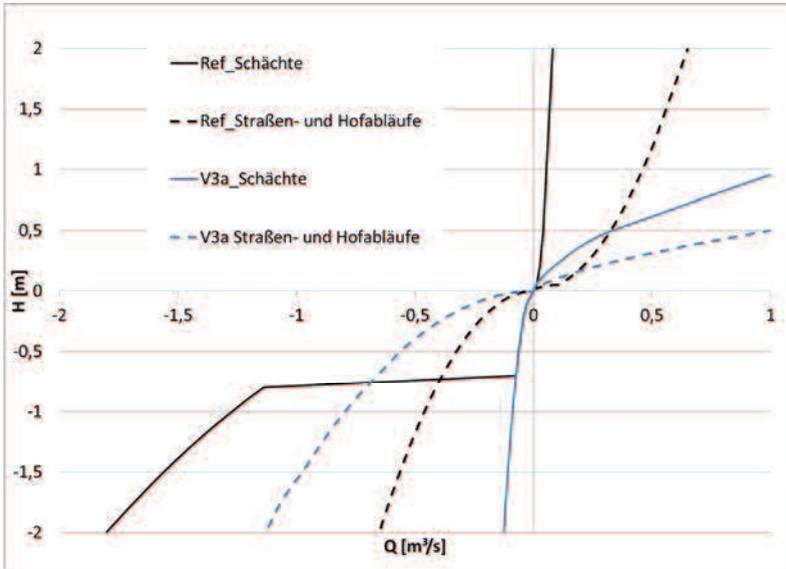


Abbildung 5-18: Q-H-Beziehung an Schächten und Straßen-/Hofabläufen in V3a im Vergleich zum Referenzmodell (negative Werte: Kanalaustritt, positive Werte: Kanaleintritt)

Die Modellanpassungen in Variante 3a lassen eine Erhöhung des Kanaleintritts an den Kopplungspunkten bei höheren Druckunterschieden (Wasserständen) erwarten. Bei geringen Druckunterschieden sollten sie zu einer Verringerung des Kanaleintritts führen. Der Kanalaustritt an den Straßenabläufen wird durch die Modellvariante begünstigt. Der Kanalaustritt bleibt an den Schächten gleich, gegenüber dem Referenzmodell entfällt jedoch die Modellierung des Heraushebens der Kanaldeckel bei hohem Druckunterschied.

### ***Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten***

Wie die Gesamtbilanz des Austauschvolumens in Abbildung 5-19 zeigt, verringert sich in Modellgebiet 1 sowohl der Kanaleintritt als auch der Kanalaustritt minimal. Es kommt dabei zu einem leichten Anstieg des Verhältnisses zugunsten der Straßenabläufe. Grund für die tendenzielle Abnahme sind die in Modellgebiet 1 über den Großteil der Fläche und der Zeit vorherrschenden eher niedrigen Wasserstände.

In Modellgebiet 2 nimmt der Kanalaustritt aufgrund der fehlenden Modellierung des Heraushebens der Kanaldeckel leicht ab. Der Kanaleintritt nimmt deutlich zu. Insbesondere steigt der Anteil der Schächte am Kanaleintritt an. Der Anstieg ist durch die hohen Wasserstände im Bereich der westlichen Tieflage in Modellgebiet 2 zu erklären. Durch den Ansatz der Überfallformel kommt es hier bei hohen

Druckunterschieden zu sehr viel höherem Kanaleintritt an den Schächten als unter Ansatz der Ausflussformel im Referenzmodell.

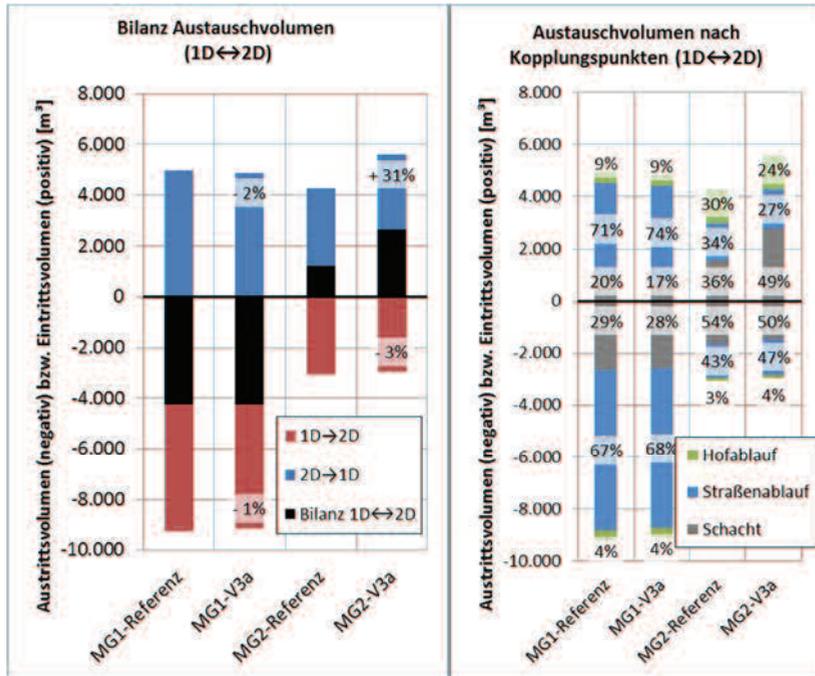


Abbildung 5-19: Bilanz des Austauschvolumens (links) und Austauschvolumen nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 3a in beiden Modellgebieten

Auch bei der Betrachtung des Kanaleintritts und des Kanalaustritts über die Zeit, dargestellt in Abbildung 5-20, werden starke Unterschiede zwischen Referenzmodell und Variante 3a für Modellgebiet 2 deutlich. Für Modellgebiet 1 sind auch in dieser Betrachtung nur minimale Unterschiede feststellbar (nicht dargestellt).

Die vergleichende Darstellung des Kanalaustauschs über die Zeit für Modellgebiet 2 zeigt einen ähnlichen Anstieg des Kanaleintritts bis zur Spitze im Referenzmodell und in der Variante 3a. In der Variante 3a ist der Anteil der Straßenabläufe leicht erhöht. Die Spitze des Kanalaustritts ist aufgrund der fehlenden Modellierung eines Heraushebens der Kanaldeckel bei hohem Druckunterschied in der Variante 3a schwächer ausgeprägt als im Referenzmodell. Entsprechend geringer ist auch der Anteil der Schächte am Kanalausritt während der Anteil der Straßenabläufe leicht zunimmt. Deutlich erkennbar ist auch der in der Variante 3a nach der Spitze stärker ausgeprägte und länger anhaltende Kanaleintritt, der durch einen hohen Anteil des Eintritts über die Schächte in der Talsohle begründet ist.

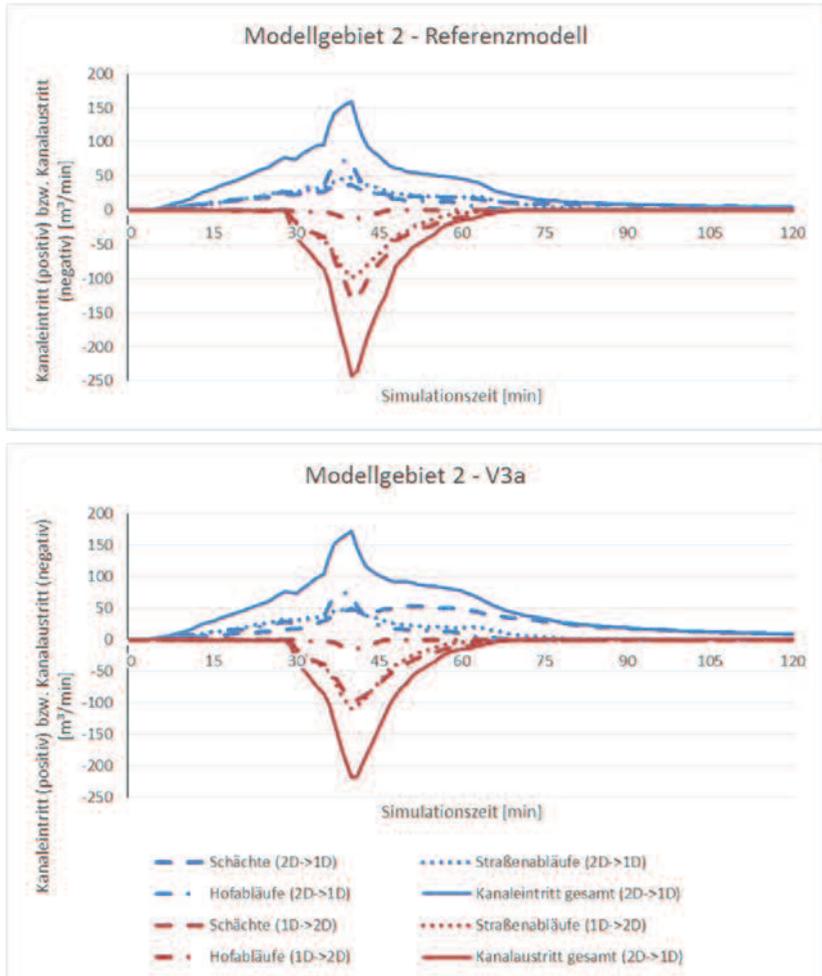


Abbildung 5-20: Kanaleintritt und -austritt über die Zeit nach Kopplungspunkten und in Summe – Referenz und Variante 3a

### ***Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche***

Die maximale Wassermenge auf der Oberfläche verändert sich in dem stark von Rückstau geprägten Modellgebiet 1 nur unwesentlich. In Modellgebiet 2 kommt es zu einer leichten Abnahme. Der Zeitpunkt der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche ändert sich nicht.

Tabelle 5-8: Werte der Vergleichsindikatoren für Referenzzustand und Variante 3a für beide Modellgebiete

		MG1		MG2	
		Ref	V3a	Ref	V3a
<b>Maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[m <sup>3</sup> ]	4.795	4.793	5.008	4.861
			- 0,0%		- 2,9%
<b>Zeitpunkt maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[min]	110	110	52	52
			+ 0,0%		+ 0,0%
<b>Summenindikator Gefahr (Wasserstand)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	21.842	21.736	21.747	21.393
			- 0,5%		- 1,6%
<b>Summenindikator Gefährdung (Wasserstand)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	54	54	573	572
			+ 0,0%		- 0,2%
<b>Gebäudekantenlänge GK 2-4</b>	[m]	350	335	1.938	1.942
			- 4,3%		+ 0,2%
<b>Betroffene Gebäudefläche</b>	[m <sup>2</sup> ]	50	48	710	702
			- 4,0%		- 1,1%
<b>Summenindikator Gefahr (Fließgeschwindigkeit)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	4.959	4.862	10.232	10.175
			- 2,0%		- 0,6%
<b>Summenindikator Gefährdung (Fließgeschwindigkeit)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	8	8	260	261
			+ 0,0%		+ 0,4%

### ***Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Der Vergleich der Gefährdungskarten (siehe Anhang A.1.1 und A.1.11) und der Summenindikatoren zeigt für Modellgebiet 1 nahezu keinen Unterschied bzgl. der wasserstandbedingten Gefährdung. Die objektbezogene Gefährdung ändert sich nicht. In Modellgebiet 2 sind minimale Unterschiede beim Vergleich der maximalen Wasserstände in der Tieflage erkennbar. Die Unterschiede hinsichtlich der Überflutungsgefährdung sind unwesentlich.

### ***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Der Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung ist ebenfalls nur geringfügig.

### ***Bewertung***

Der konventionelle Ansatz der Wehrüberfallformel führt zu stark erhöhtem Kanaleintritt bei hohen Wasserständen. Die fehlende Modellierung des Heraushebens der Schachtdeckel macht sich deutlich in den Werten zum Kanalaustritt bemerkbar. Diese Phänomene treten jedoch nur in Modellgebiet 2 auf, in dem aufgrund der Topografie ausgeprägte Tieflagen und hohe Druckunterschiede existieren. Im fla-

cheren Modellgebiet 1 kommt es aufgrund der vergleichsweise niedrigen Wasserstände und der zeitlich ausgedehnten Rückstapphase nur zu sehr geringen Unterschieden zwischen Referenzmodell und Variante 3a.

Der Einfluss auf die Aussagen zu Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung ist im flachen Modellgebiet 1 verschwindend gering.

In Modellgebiet 2 ist ein Einfluss auf die Überflutungsgefahr nur in der Tieflage zu erkennen, in der die flächenmäßige Ausdehnung hoher maximaler Wasserstände durch den erhöhten Kanaleintritt leicht begrenzt wird. Auch besteht ein großer Einfluss auf die Entleerungszeit der Tieflage, die in der Variante 3a sehr viel kürzer ist.

Die gebietsweite Gefährdungsaussage wird in Variante 3a ebenfalls kaum beeinflusst. Ebenso verändert sich die objektspezifische Gefährdungsaussage kaum.

Für die vorliegenden kleinräumigen Betrachtungen ergeben sich insgesamt eher geringe Auswirkungen. Bei hohen Wasserständen und einer gleichzeitig geringen Auslastung des Kanals kann durch die Ansätze in der Variante 3a ein stark erhöhter Kanaleintritt entstehen, der sich dann weiter unterhalb auch wieder auf die Gefährdungsaussage auswirken kann. Mit den hier betrachteten Modellgebieten konnte diese Annahme nicht untersucht werden.

#### 5.2.3.2 *Variante 3b: Einfluss der Modellierung eines neigungsdifferenzierten hydraulischen Zusammenhangs an den Straßenabläufen*

Das Referenzmodell beinhaltet für Wasserstände bis zu 5 cm einen neigungsabhängigen hydraulischen Zusammenhang für den Wassereintritt in die Straßenabläufe, basierend auf den Erkenntnissen aus MKULNV NRW (2016). In Variante 3b wird der Einfluss der neigungsdifferenzierten Abbildung des hydraulischen Zusammenhangs an den Straßenabläufen untersucht, indem dieser durch einen neigungsunabhängigen, pauschalen Ansatz ersetzt wird.

#### **Veränderungen im Modell durch die Variante**

Im Referenzmodell sind an den Straßenabläufen in Abhängigkeit der jeweiligen Straßenlängsneigung unterschiedliche Wasserstand-Abfluss-Beziehungen hinterlegt (siehe Kapitel 4.4.3). In Variante 3b wird allen Straßenabläufen unabhängig von der Längsneigung einheitlich die Beziehung für eine mittlere Längsneigung von 2,5% zugeordnet (Abbildung 5-21).

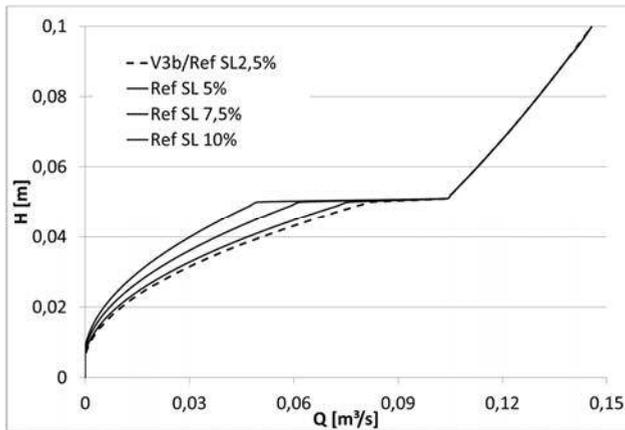


Abbildung 5-21: Q-H-Beziehungen für den Kanaleintritt an den Straßenabläufen in Referenzmodell und Variante 3b

### **Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten**

Im Bereich des sehr flachen Modellgebiets 1 existieren außer der kleinsten Neigungsklasse kaum andere Klassen. Entsprechend verändert sich an den Kopplungspunkten der Austausch gegenüber dem Referenzmodell kaum.

Infolge der veränderten Q-H-Beziehungen an den 103 Straßenabläufen im Hangbereich von Modellgebiet 2 erhöht sich der Kanaleintritt. Der Unterschied zum Referenzmodell ist jedoch minimal. Auch der Kanalaustritt steigt infolgedessen etwas an. Das Verhältnis des Austauschs an den Kopplungspunkten erhöht sich beim Kanaleintritt minimal zugunsten der Straßenabläufe, beim Kanalaustritt minimal zugunsten der Schächte

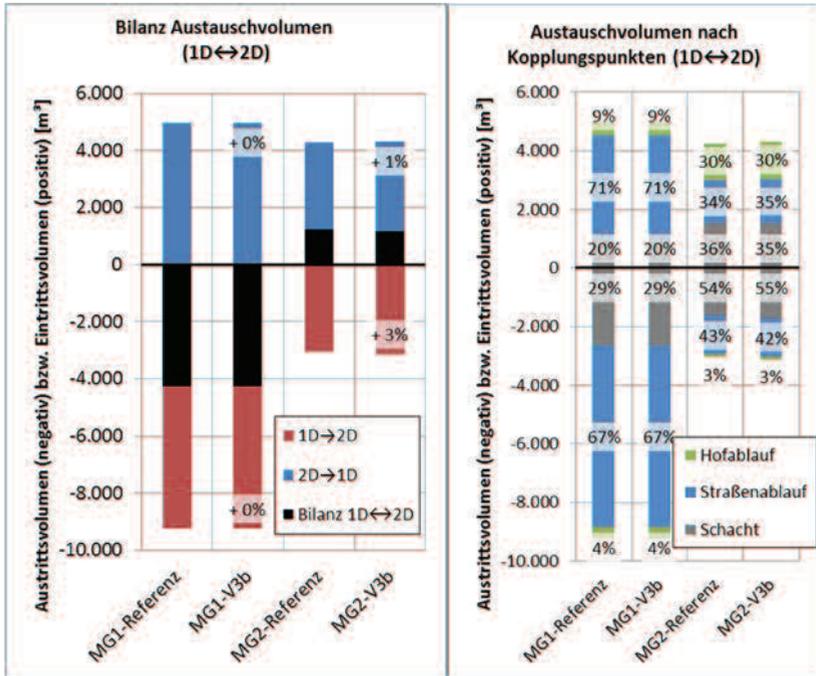


Abbildung 5-22: Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 3b in beiden Modellgebieten

### **Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche**

Die maximale Wassermenge auf der Oberfläche verändert sich in Modellgebiet 1 für die Variante 3b nicht. In Modellgebiet 2 wird diese infolge des leicht erhöhten Kanaleintritts minimal verringert. Der Zeitpunkt für die maximale Wassermenge auf der Oberfläche ändert sich in beiden Gebieten nicht.

### **Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung**

In Bezug auf die Indikatoren zu Gefahr und Gefährdung ist die Veränderung in beiden Gebieten nur geringfügig. Im Vergleich der Gefährdungskarten fallen nur minimale Unterschiede auf (siehe Anhang A.1.1 und A.1.13 bzw. A.2.1 und A.2.13).

Tabelle 5-9: Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 3b für beide Modellgebiete

		MG1		MG2	
		Ref	V3b	Ref	V3b
<b>Maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[m <sup>3</sup> ]	4.795	4.795	5.008	5.002
			- 0,0%		- 0,1%
<b>Zeitpunkt maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[min]	110	110	52	52
			+ 0,0%		+ 0,0%
<b>Summenindikator Gefahr (Wasserstand)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	21.842	21.732	21.747	21.697
			- 0,5%		- 0,2%
<b>Summenindikator Gefährdung (Wasserstand)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	54	54	573	574
			+ 0,0%		+ 0,2%
<b>Gebäudekantenlänge GK 2-4</b>	[m]	350	335	1.938	1.928
			- 4,3%		- 0,5%
<b>Betroffene Gebäudefläche</b>	[m <sup>2</sup> ]	50	48	710	708
			- 4,0%		- 0,3%
<b>Summenindikator Gefahr (Fließgeschwindigkeit)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	4.959	4.908	10.232	10.180
			- 1,0%		- 0,5%
<b>Summenindikator Gefährdung (Fließgeschwindigkeit)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	8	8	260	260
			+ 0,0%		+ 0,0%

### ***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Die fließgeschwindigkeitsbezogenen Indikatoren zeigen kaum Veränderungen an.

### ***Bewertung***

Die Unterschiede zwischen Referenzmodell und Variante 3b sind minimal. Eine neigungsabhängige Zuordnung der aus MKULNV NRW (2016) abgeleiteten Q-H-Beziehungen scheint selbst für das steilere Modellgebiet 2 von geringer Relevanz zu sein. Die allgemeine Abbildung des hydraulischen Zusammenhangs an den Straßenabläufen über die abgeleiteten Beziehungen nach MKULNV NRW (2016) hat im Vergleich zu einer Abbildung über die Überfallformel einen deutlich höheren Einfluss (siehe Variante 3a).

#### ***5.2.3.3 Variante 3c: Einfluss durch die Begrenzung der Ein- und Auslaufkapazität der Straßen- und Hofabläufe***

Die maximale Leistungsfähigkeit von Straßenabläufen wird nicht nur vom Gitterrost bestimmt (Kemper et al. 2016). Angaben zur Leistungsfähigkeit des gesamten Straßenablaufs unterscheiden sich zwar, eine Reduzierung der Kapazität durch Verlegung oder Zusetzen des Fangkorbs ist jedoch wahrscheinlich. Wie in Kapitel

4.4.3 beschrieben wird in Variante 3c die Kapazität der Straßenabläufe auf 20 l/s begrenzt und der Einfluss dieser Modellanpassung auf Simulationsergebnisse und Gefährdungsaussage untersucht.

***Veränderungen im Modell durch die Variante 3c***

In Variante 3c sind die Q-H-Beziehungen an Straßenabläufen und Hofabläufen so modifiziert, dass der maximale Austausch auf 20 l/s begrenzt wird.

***Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten***

In den Ergebnissen zum Austausch an den Kopplungspunkten, dargestellt in den Säulendiagrammen in Abbildung 5-23, ist eine Abnahme von Kanaleintritt und Kanalausritt in beiden Gebieten erkennbar. Der Blick auf die Anteile der Kopplungspunkte am Austauschvolumen zeigt, dass die Abnahme des Kanalaustritts an den Straßenabläufen größer ist und gleichzeitig teilweise von den Schächten kompensiert wird. Bezüglich des Kanaleintritts ist dies nicht der Fall. Im stark von Kanalarückstau gekennzeichneten Modellgebiet 1 ist der Rückgang des Kanalaustritts in Variante 3c größer als in Modellgebiet 2. In Modellgebiet 2 ist dagegen die Beeinflussung des Kanaleintritts durch die Begrenzung der maximalen Kapazität auf 20 l/s größer.

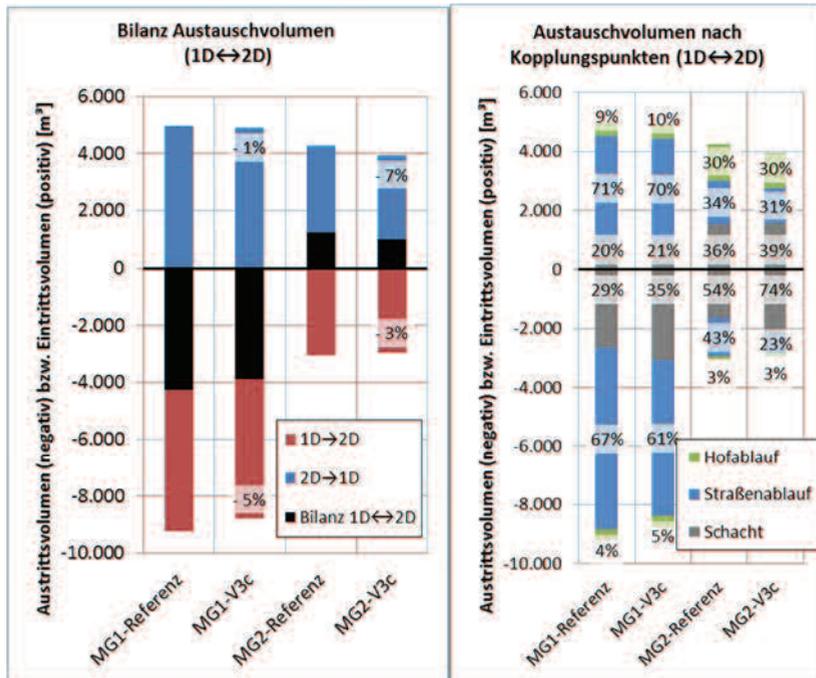


Abbildung 5-23: Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 3c in beiden Modellgebieten

### ***Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche***

Durch den verringerten Kanalaustritt in Modellgebiet 1 sinkt die maximale Wassermenge auf der Oberfläche leicht ab und es kommt zu einer minimalen Verzögerung des Zeitpunkts der maximalen Überflutung.

In Modellgebiet 2 sorgt der geringere Kanaleintritt für eine zunehmende maximale Wassermenge auf der Oberfläche. Auch hier verzögert sich der Zeitpunkt der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche um 1 Minute.

### ***Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Der Summenindikator zur wasserstandbedingten Gefahr verändert sich in beiden Gebieten entsprechend der Veränderung der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche leicht. Der Vergleich der Gefährdungskarten zeigt in Modellgebiet 1 eine minimale Abnahme von Wasserständen in den rückstaubetroffenen Bereichen, vorrangig im Straßenraum (siehe Anhang A.1.1 und A.1.15). In den nicht von

Rückstau betroffenen Bereichen kommt es zu einem leichten Anstieg der Wasserstände und infolge dessen auch zu erhöhten Wasserständen. Im Süden des Gebiets wirkt sich dies insbesondere auf den Wasserstand im Kellerzugang aus. Dies ist das einzige Gebäude, dessen Gefährdungsklasse sich gegenüber dem Referenzmodell ändert. Aufgrund der Verlagerung der Wasserstände (geringere Wasserstände auf der Fläche, jedoch mehr Wasser in Gebäudenähe) kommt es trotz insgesamt leicht abnehmender Werte des Summenindikatoren für die Gefahr zu leicht höheren Werten für den Summenindikator Gefährdung. In den Hofbereichen kommt es vereinzelt zu erhöhten Wasserständen.

In Modellgebiet 2 erhöhen sich die Wasserstände im Straßenraum im Westen und in der Mitte des Gebiets sowie in mehreren Hofbereichen und in der Talsohle. Hierdurch erhöhen sich an einigen Gebäuden die Gefährdungsklassen. Dieses spiegelt sich entsprechend im leicht zunehmenden Summenindikator Gefährdung für das Gesamtgebiet wider.

Tabelle 5-10: Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 3c für beide Modellgebiete

		MG1		MG2	
		Ref	V3c	Ref	V3c
<b>Maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[m <sup>3</sup> ]	4.795	4.704	5.008	5.137
			- 1,9%		+ 2,6%
<b>Zeitpunkt maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[min]	110	111	52	53
			+ 0,9%		+ 1,9%
<b>Summenindikator Gefahr (Wasserstand)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	21.842	21.139	21.747	22.426
			- 3,2%		+ 3,1%
<b>Summenindikator Gefährdung (Wasserstand)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	54	55	573	590
			+ 1,9%		+ 3,0%
<b>Gebäudekantenlänge GK 2-4</b>	[m]	350	348	1.938	1.995
			- 0,6%		+ 2,9%
<b>Betroffene Gebäudefläche</b>	[m <sup>2</sup> ]	50	51	710	735
			+ 2,0%		+ 3,5%
<b>Summenindikator Gefahr (Fließgeschwindigkeit)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	4.959	4.383	10.232	10.079
			- 11,6%		- 1,5%
<b>Summenindikator Gefährdung (Fließgeschwindigkeit)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	8	8	260	259
			+ 0,0%		- 0,4%

### ***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Der Summenindikator zur fließgeschwindigkeitsbedingten Überflutungsgefahr nimmt in beiden Modellgebieten ab. Ursache ist der reduzierte Kanalaustritt in den

Tieflagen. In Modellgebiet 2 kommt es aber lokal auch zu höheren Fließgeschwindigkeiten infolge des geringeren Kanaleintritts im Straßenraum in der Mitte des Gebiets. Die fließgeschwindigkeitsbedingte Gefährdung verändert sich kaum.

### **Bewertung**

Die Implementierung einer Maximalbegrenzung der Austauschkapazität der Straßen- und Hofabläufe führt zu deutlichen Auswirkungen auf das Kopplungsverhalten. Die Begrenzung führt in nicht rückstaubehafteten Straßen zu einer leichten Erhöhung der Überflutungsgefahr, sowohl infolge des Wasserstands als auch infolge der Fließgeschwindigkeiten. Bei Kanalrückstau kommt es zu einer leichten Reduzierung des Kanalaustritts. Die maximalen Wasserstände in den Tieflagen werden durch die Begrenzung nicht beeinflusst. Bei der individuellen Überflutungsgefährdung besonders in topografisch bewegten Bereichen, zeigt sich eine deutliche Beeinflussung.

Bei Kenntnis über die maximale Kapazität der Straßenabläufe sollten die entsprechenden Obergrenzen definiert werden.

#### **5.2.3.4 Variante 3d: Einfluss durch eine fehlende Modellierung eines „Heraushebens der Schachtdeckel“**

In Variante 3d wird die Auswirkung auf die Modellergebnisse untersucht, wenn ein Herausheben der Schachtdeckel bei entsprechendem Druck nicht modelliert wird.

#### **Veränderungen im Modell durch die Variante 3d**

In Variante 3d wird die Q-H-Beziehung an den Schachtdeckeln so angepasst, dass eine Vergrößerung der lichten Fläche nicht stattfindet. Es wird für alle Druckzustände beim Kanalaustritt lediglich die Öffnungsfläche der Lüftungslöcher angesetzt.

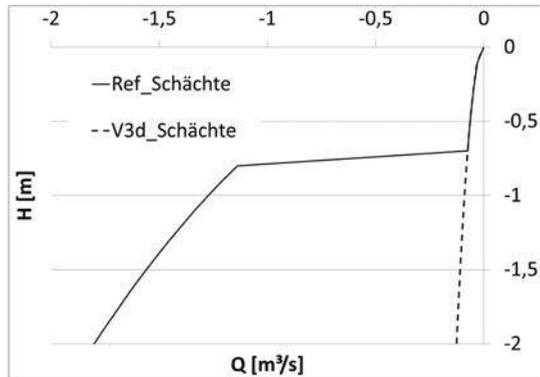


Abbildung 5-24: Hydraulische Abbildung der Schächte in Variante 3d

### ***Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten***

Für Modellgebiet 1 ist in den Ergebnissen zum Austauschvolumen an den Kopplungspunkten (Abbildung 5-25) keinerlei Beeinflussung durch die Modifizierung zu erkennen. Aufgrund der flachen Topografie treten trotz ausgeprägtem Kanalarückstau und Überstau keine für das Herausheben der Deckel relevanten Druckunterschiede auf.

In Modellgebiet 2 tritt eine deutliche Abnahme des Anteils der Schächte am Kanalausstritt auf. Dieser wird aber fast vollständig von den Straßenabläufen kompensiert. Hier kommt es im Referenzmodell an mehreren Schächten zu einem Herausheben der Schachtdeckel, welches in Variante 3d nicht abgebildet wird.

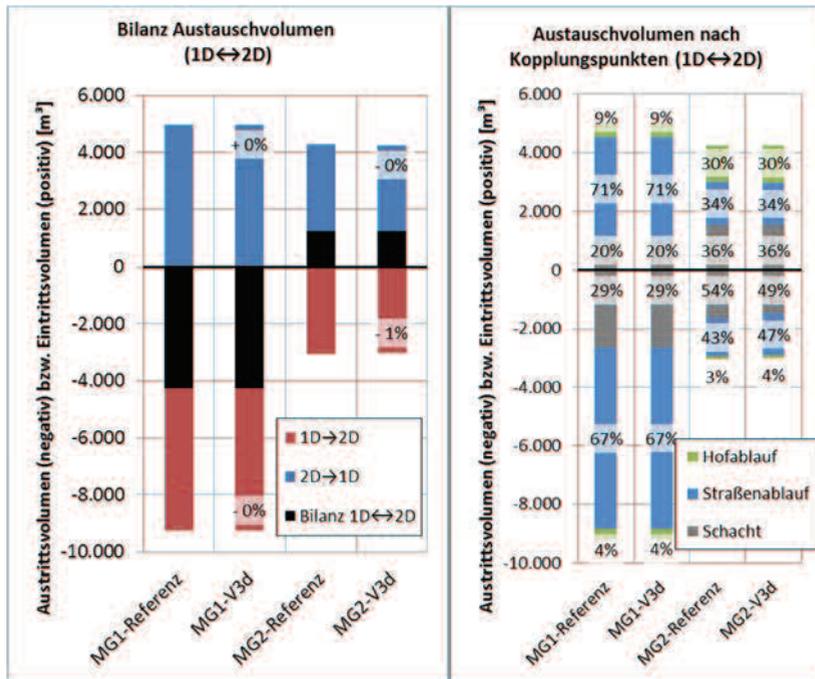


Abbildung 5-25: Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Koppelpunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 3d in beiden Modellgebieten

### **Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche**

Da die Modifizierung aus den genannten Gründen keine Auswirkungen in Modellgebiet 1 zeigt, ändert sich die maximale Wassermenge auf der Oberfläche nicht.

In Modellgebiet 2 kommt es durch die Verlagerung des Kanalaustritts auf die Straßenabläufe zu einer leichten örtlichen Verschiebung des Wassers auf der Oberfläche. Die maximale Wassermenge auf der Oberfläche erhöht sich in Modellgebiet 2 leicht, da durch die Verlagerung weniger oberflächlich abfließendes Wasser das Gebiet im Westen verlässt, sondern an weiter innerhalb des Gebiets befindlichen Straßenabläufen austritt und in der Fläche verbleibt.

Der Zeitpunkt der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche verändert sich in keinem der beiden Gebiete.

Tabelle 5-11: Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 3d für beide Modellgebiete

		MG1		MG2	
		Ref	V3d	Ref	V3d
<b>Maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[m <sup>3</sup> ]	4.795	4.795	5.008	5.064
			+ 0,0%		+ 1,1%
<b>Zeitpunkt maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[min]	110	110	52	52
			+ 0,0%		+ 0,0%
<b>Summenindikator Gefahr (Wasserstand)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	21.842	21.842	21.747	21.859
			+ 0,0%		+ 0,5%
<b>Summenindikator Gefährdung (Wasserstand)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	54	54	573	573
			+ 0,0%		+ 0,0%
<b>Gebäudekantenlänge GK 2-4</b>	[m]	350	350	1.938	1.933
			+ 0,0%		- 0,3%
<b>Betroffene Gebäudefläche</b>	[m <sup>2</sup> ]	50	50	710	712
			+ 0,0%		+ 0,3%
<b>Summenindikator Gefahr (Fließgeschwindigkeit)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	4.959	4.959	10.232	10.304
			+ 0,0%		+ 0,7%
<b>Summenindikator Gefährdung (Fließgeschwindigkeit)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	8	8	260	260
			+ 0,0%		+ 0,0%

#### ***Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Die Indikatoren zur wasserstandbedingten Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung ändern sich in Modellgebiet 1 nicht. In Modellgebiet 2 kommt es durch die minimale örtliche Verlagerung von Wasserständen an zwei Gebäuden zu Veränderungen in der Gefährdungsaussage.

#### ***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Die Werte der Indikatoren zur fließgeschwindigkeitsbedingten Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung ändert sich in Modellgebiet 1 ebenfalls nicht. In Modellgebiet 2 kommt es zu einer Abnahme der Fläche mit erhöhten Fließgeschwindigkeiten aufgrund des geringeren maximalen Kanalaustritts an den Schächten. Wie bei den berechneten Wasserständen treten auch hier leichte lokale Verlagerungen durch die Kompensation des Schachtaustritts durch die Straßenabläufe auf.

#### ***Bewertung***

Zu Druckunterschieden, die zu einem Herausheben der Deckel führen, kommt es nur im topografisch stärker bewegten Modellgebiet 2.

In dieser Betrachtung führt die fehlende Modellierung des Heraushebens der Schachtdeckel nur zu sehr geringen Unterschieden bzgl. des berechneten Wasserstands und der Fließgeschwindigkeit. Der verringerte Kanalaustritt an den Schächten wird durch einen entsprechend höheren Austritt an den Straßenabläufen kompensiert, wodurch es zu geringfügigen Verlagerungen der Gefahrensituation kommt.

Die fehlende Modellierung des Heraushebens der Deckel scheint bei gleichzeitiger Modellierung von Straßenabläufen im Modell keine große Auswirkung zu haben. Bei (zusätzlich) fehlender Modellierung von Straßenabläufen sind größere Auswirkungen zu erwarten.

#### **5.2.4 Einfluss der Abflusskonzentration (Variante 4)**

Bi-direktional gekoppelte Abflussmodelle wurden aus dem konventionellen Kanalnetzmodellansatz entwickelt. Der dort gebräuchliche hydrologische Ansatz zur Abbildung der Abflusskonzentration (=kompletter Abfluss wird im Kanalnetzmodell gebildet und den Knoten und Haltungen direkt zugegeben) wird auch heute noch häufig für Simulationen mit gekoppelten Modellen verwendet (siehe Kapitel 2.2.4 und 4.4.4).

##### **5.2.4.1 Variante 4a: Hydrologische Abflusskonzentration ohne Straßen- und Hofabläufe (konventioneller Ansatz)**

In Variante 4a soll der Unterschied des konventionellen Ansatzes einer hydrologischen Abflusskonzentration ohne Abbildung von Straßen- und Hofabläufen zum detaillierteren Referenzmodell aufgezeigt werden.

##### **Modellveränderungen in der Variante 4a**

In Variante 4a wird der komplette Niederschlagsabfluss direkt dem Kanalnetzmodell zugeordnet. Im Referenzmodell ist dies nur für die Dachflächen der Fall. Das Oberflächenmodell wird in Variante 4a nicht direkt berechnet. Zu Wasserständen und Abfluss auf der Oberfläche kann es in diesem Modellansatz nur durch austretendes Wasser aus dem überlasteten Kanalnetz an die Oberfläche kommen. Weiterhin sind aus dem Referenzmodell alle Straßen- und Hofabläufe mitsamt ihrer Anschlussleitungen entfernt. Die Schächte werden als offen (ohne Schachtdeckel) angesetzt, der hydraulische Zusammenhang zum Kanaleintritt wird über die Überfallformel abgebildet.

##### **Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten**

Die Modellanpassungen in der Variante 4a haben große Auswirkungen auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten. Der Vergleich in Abbildung 5-26

zeigt einen deutlichen Rückgang des Kanaleintritts in beiden Gebieten. Dieser ist durch die direkte Zuordnung des Niederschlagsabflusses zum Kanalnetzmodell zu begründen. Bei dem an den Kopplungspunkten bilanzierten Kanaleintritt handelt es sich in Modellgebiet 1 ausschließlich um wiedereintretendes Wasser. In Modellgebiet 2 kommen noch die Außengebietszuflüssen hinzu, die dem Siedlungsgebiet oberirdisch im Oberflächenmodell zufließen. Der Kanalaustritt nimmt in beiden Modellgebieten infolge der stärkeren Auslastung des Kanals zu. Aufgrund der Entfernung von Straßen- und Hofabläufen erfolgt der gesamte Kopplungsprozess in beiden Gebieten über die Schächte.

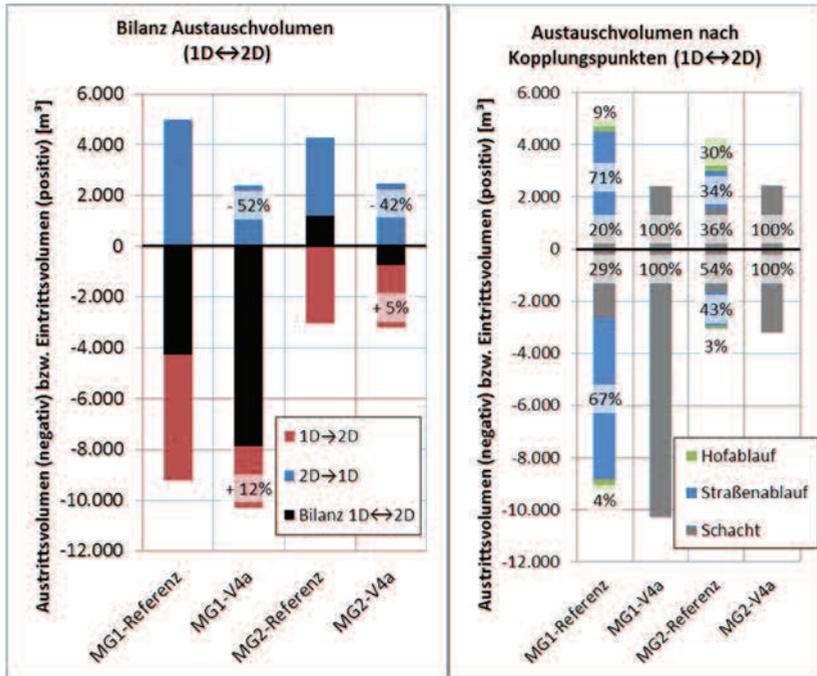


Abbildung 5-26: Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 4a in beiden Modellgebieten

### **Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche**

Durch die direkte Zuordnung des Niederschlagsabflusses zum Kanalnetzmodell reduziert sich die maximale Wassermenge auf der Oberfläche in beiden Gebieten. Da das überflutungsrelevante Wasser zunächst vollständig über das Kanalnetz austreten muss, verschiebt sich der Zeitpunkt der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche in beiden Gebieten nach hinten. In dem auch im Referenzmodell stark

von Rückstau geprägten Modellgebiet 1 ist diese Verzögerung im Vergleich zu Modellgebiet 2 geringer.

Tabelle 5-12: Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 4a für beide Modellgebiete

		MG1		MG2	
		Ref	V4a	Ref	V4a
Maximale Wassermenge Oberfläche	[m <sup>3</sup> ]	4.795	4.152	5.008	3.979
			- 13,4%		- 20,6%
Zeitpunkt maximale Wassermenge Oberfläche	[min]	110	112	52	56
			+ 1,8%		+ 7,7%
Summenindikator Gefahr (Wasserstand)	[m <sup>2</sup> ×#GK]	21.842	19.929	21.747	13.774
			- 8,8%		- 36,7%
Summenindikator Gefährdung (Wasserstand)	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	54	15	573	323
			- 72,2%		- 43,6%
Gebäudekantenlänge GK 2-4	[m]	350	118	1.938	973
			- 66,3%		- 49,8%
Betroffene Gebäudefläche	[m <sup>2</sup> ]	50	16	710	371
			- 68,0%		- 47,7%
Summenindikator Gefahr (Fließgeschwindigkeit)	[m <sup>2</sup> ×#GK]	4.959	8.889	10.232	9.881
			+ 79,2%		- 3,4%
Summenindikator Gefährdung (Fließgeschwindigkeit)	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	8	7	260	140
			- 12,5%		- 46,2%

### ***Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

In Modellgebiet 1 steht aufgrund der fehlenden direkten Berechnung des Oberflächenmodells und der fehlenden Hofabläufe keinerlei Oberflächenwasser in den Hofbereichen an. Wie sich in den leicht erhöhten Wasserständen im Straßenraum zeigt (siehe Anhang A.1.19), erhöht sich der Überstau im Gebiet durch die direkte Zuordnung des Niederschlagsabflusses zum Kanalnetzmodell. Entsprechend reduziert sich der Summenindikator Gefahr. Alle Gefährdungslagen, die auf Wasserständen im Hofbereich basieren, verschwinden in Variante 4a. Dies macht sich durch eine drastische Abnahme des Gefährdungsindicators bemerkbar.

In Modellgebiet 2 reduzieren sich die Indikatoren zur wasserstandbedingten Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung ebenfalls deutlich. Grund hierfür sind geringere Wasserstände in der nicht rückstaubelasteten Hanglage sowie in der Talsohle infolge geringerer Zuflüsse aus der Hanglage. Die übrigen Wasserstände in der Hanglage sind Folge der Außengebietszuflüsse, die aus den östlichen, höher gelegenen Feldern hinzukommen.

### ***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

In Modellgebiet 1 nimmt die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr deutlich zu. Grund hierfür ist der stark zunehmende Kanalarückstau und die Konzentration des gesamten Kanalarückstaus auf die im Modell geöffneten Schächte. Hier kommt es beim Kanalaustritt zu hohen Fließgeschwindigkeiten im Straßenraum.

In Modellgebiet 2 überwiegen im Referenzmodell die durch oberflächigen Abfluss bedingten höheren Fließgeschwindigkeiten. In Variante 4a fallen diese größtenteils weg. Dies zeigt sich durch insgesamt geringere Werten für die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung.

### ***Bewertung***

Durch die im Vergleich zum Referenzmodell veränderte Abflusskonzentration und die fehlenden Straßenabläufe und Hofabläufe kommt es in der Variante 4a in beiden Modellgebieten zu starken Abweichungen in der Gefährdungsaussage. Die Gründe hierfür unterscheiden sich für die beiden Modellgebiete:

- Im flachen Modellgebiet 1 lässt sich der Unterschied ausschließlich auf die fehlenden Wasserstände im Innenhofbereich zurückführen. Die Wasserstände im Straßenraum werden in der Variante 4a kaum beeinflusst. Sie erhöhen sich minimal.
- Im steileren Modellgebiet 2 liegt die Ursache in den stark reduzierten Hangabflüssen infolge fehlender direkter Beregnung des Oberflächenmodells. Diese wirken sich sowohl auf die Wasserstände in der Hanglage als auch auf die Wasserstände in der Talsohle aus.

Der Zeitpunkt der maximalen Überflutung wird durch die hydrologische Abflusskonzentration verzögert.

Mit der rein hydrologischen Abflusskonzentration unter Ansatz geöffneter Schächte als den einzigen Kopplungspunkten ist eine Information zu möglichen Gefährdungslagen in abgeschlossenen Hofbereichen nicht möglich. In rein rückstaubedingten Gefährdungslagen, die nur gering durch den Zufluss oberflächlich abfließenden Wassers beeinflusst werden, sind die Ergebnisse zwischen den beiden Methoden vergleichbar. Bei stärkerer Hangneigung kommt es zu einer massiven Unterschätzung des Hangabflusses im Vergleich zum Referenzmodell. Durch die geöffneten Schächte kommt es darüber hinaus zu einer erheblichen Überschätzung des Kanaleintritts und des Kanalaustritts. Dies kann zu einer starken Beeinflussung der lokalen Gefährdungsaussage führen.

Bei Anwendung einer gekoppelten 1D/2D-Abflusssimulation, muss eine direkte Beregnung des Oberflächenmodells außerhalb der Dachflächen erfolgen. Wenn keinerlei Informationen zu Hofabläufen vorliegen, kann eine rein hydrologische

Abflussbildung im Bereich der Hofflächen empfehlenswert sein. Eine Aussage zur Gefährdung im Hofbereich kann dann aber nicht erfolgen. Zudem führt die hydrologische Abflussbildung der Hofflächen bei starker Hangneigung zu einer Unterschätzung des Hangabflusses und kann so die Gefährdungsaussage für die Tieflagen deutlich beeinflussen.

#### **5.2.4.2 Variante 4b: Hydrologische Abflusskonzentration mit Straßen- und Hofabläufen**

Während Variante 4a den Vergleich zwischen dem konventionellen Ansatz und dem Referenzmodell beinhaltet, ist das Ziel der Betrachtung in Variante 4b, den alleinigen Effekt einer Änderung der Abflusskonzentration zu untersuchen. In Variante 4a wird der Effekt einer Änderung der Abflusskonzentration durch die gleichzeitige Entfernung der Straßen- und Hofabläufe überlagert. In Variante 4b werden gegenüber dem Referenzmodell nur die Abflusskonzentration verändert, die Straßenabläufe und Hofabläufe bleiben im Modell enthalten.

##### **Veränderungen im Modell durch die Variante 4b**

In Variante 4b wird der komplette Niederschlagsabfluss direkt dem Kanalnetzmodell zugeordnet. Die hydraulischen Ansätze an Schächten, Straßenabläufen und Hofabläufen werden gegenüber dem Referenzmodell nicht verändert.

##### **Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten**

Die veränderte Abflusskonzentration in der Variante 4b hat große Auswirkungen auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten. Der Vergleich zum Referenzmodell in Abbildung 5-27 zeigt, wie in Variante 4a, einen deutlichen Rückgang des Kanaleintritts in beiden Gebieten. Im Unterschied zu Variante 4a reduziert sich der Kanaleintritt jedoch in Modellgebiet 1 in geringerem Maße und ist in Modellgebiet 2 stärker ausgeprägt.

Der Grund für die geringere Reduzierung in Modellgebiet 1 liegt in dem im Vergleich zu Variante 4a gestiegenen Kanaleintritt, der sich durch die implementierten Straßenabläufe und Hofabläufe einstellt.

In Modellgebiet 2 kommt es in der Hanglage zu einem Anstieg des Kanaleintritts durch die Implementierung der Straßen- und Hofabläufe. In den Bereichen mit Souterrainwohnungen der Talsohle, in denen auch im Referenzmodell hauptsächlich die Schächte für den Kanaleintritt verantwortlich sind, kommt es in Variante 4b durch den geänderten hydraulischen Ansatz an den Schächten zu einem deutlich geringeren Kanaleintritt als in Variante 4a, bei der die Schächte als offen angesetzt werden.

Der Kanalaustritt nimmt gegenüber dem Referenzmodell in beiden Modellgebieten infolge der stärkeren Auslastung des Kanals zu. Die Zunahme ist leicht geringer als in der mit geöffneten Schächten angelegten Modellvariante 4a.

Die Zunahme verteilt sich in Modellgebiet 1 gleichmäßig auf Straßenabläufe und Schächte. In Modellgebiet 2 nimmt der Anteil der Schächte zu Gunsten des Anteils der Straßenabläufe leicht ab.

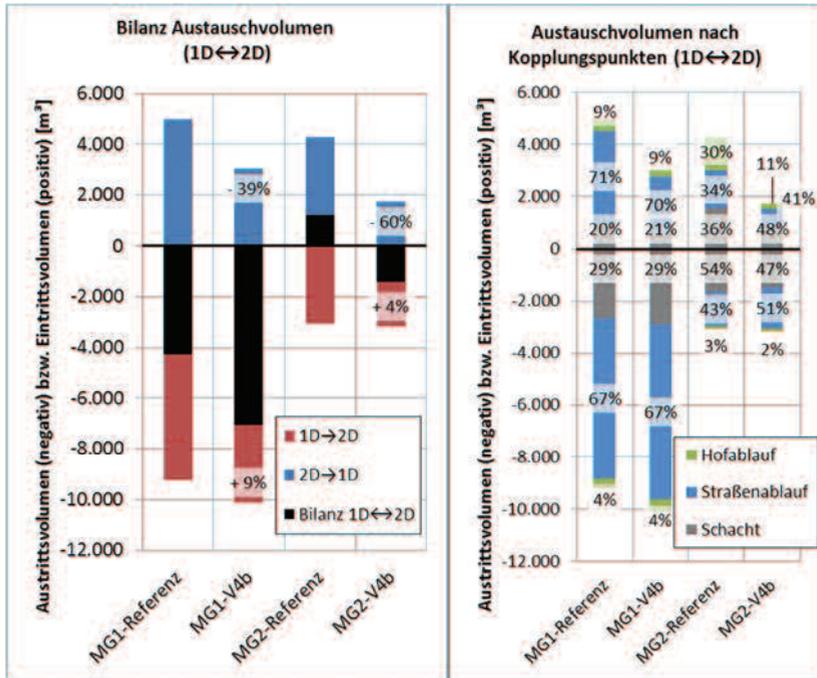


Abbildung 5-27: Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 4b in beiden Modellgebieten

### **Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche**

Durch die direkte Zuordnung des Niederschlagsabflusses zum Kanalnetzmodell reduziert sich die maximale Wassermenge auf der Oberfläche in beiden Gebieten.

Im Vergleich zu Variante 4a erhöht sich in Variante 4b die maximale Wassermenge auf der Oberfläche in beiden Gebieten leicht. In Modellgebiet 1 begründet sich dies durch den in Variante 4b auftretenden Rückstau in einzelne Hofbereiche. In Modellgebiet 2 erhöht sich die maximale Wassermenge auf der Oberfläche der Talsohle aufgrund des geringeren Kanaleintritts an den Schächten in den tieferliegenden Bereichen der Souterrainwohnungen infolge der „geschlossenen Deckel“.

Der Zeitpunkt der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche verschiebt sich wie in Variante 4a gegenüber dem Referenzmodell in beiden Gebieten nach hinten.

Tabelle 5-13: Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 4b für beide Modellgebiete

		MG1		MG2	
		Ref	V4b	Ref	V4b
Maximale Wassermenge Oberfläche	[m <sup>3</sup> ]	4.795	4.348	5.008	4.213
			- 9,3%		- 15,9%
Zeitpunkt maximale Wassermenge Oberfläche	[min]	110	114	52	60
			+ 3,6%		+ 15,4%
Summenindikator Gefahr (Wasserstand)	[m <sup>2</sup> ×#GK]	21.842	20.432	21.747	13.903
			- 6,5%		- 36,1%
Summenindikator Gefährdung (Wasserstand)	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	54	22	573	297
			- 59,3%		- 48,2%
Gebäudekantenlänge GK 2-4	[m]	350	210	1.938	955
			- 40,0%		- 50,7%
Betroffene Gebäudefläche	[m <sup>2</sup> ]	50	32	710	372
			- 36,0%		- 47,6%
Summenindikator Gefahr (Fließgeschwindigkeit)	[m <sup>2</sup> ×#GK]	4.959	6.222	10.232	6.614
			+ 25,5%		- 35,4%
Summenindikator Gefährdung (Fließgeschwindigkeit)	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	8	7	260	153
			- 12,5%		- 41,2%

### ***Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

In Modellgebiet 1 reduzieren sich aufgrund der fehlenden direkten Berechnung des Oberflächenmodells die Wasserstände in den Hofbereichen deutlich. Lediglich in Bereichen mit Kanalaustritt aus den Hofabläufen kommt es zu Wasserständen in den Hofbereichen. Die Wasserstände in den Straßenbereichen verändern sich nicht. Entsprechend reduzieren sich die Indikatoren zur wasserstandbedingten Gefahr und Gefährdung gegenüber dem Referenzmodell. Der Großteil der Gefährdungslagen, die auf Wasserständen im Hofbereich basieren, verschwindet in Variante 4b und schlägt sich in einer drastischen Abnahme des Summenindicators zur Überflutungsgefährdung nieder.

In Modellgebiet 2 reduzieren sich die Indikatoren zur wasserstandbedingten Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung ebenfalls deutlich. Grund hierfür sind geringere Wasserstände in der nicht rückstaubehafteten Hanglage sowie in der Talsohle infolge geringerer Zuflüsse aus der Hanglage.

***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

In Modellgebiet 1 nimmt die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr deutlich zu. Grund hierfür ist der erhöhte und zeitlich intensiviertere Kanalaustritt im Straßenraum.

In Modellgebiet 2 überwiegen im Referenzmodell die durch oberflächigen Abfluss bedingten höheren Fließgeschwindigkeiten. In Variante 4b fallen diese größtenteils weg. Dies spiegelt sich in insgesamt geringeren Werten für die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung in der Variante 4b wider.

***Bewertung***

Durch die im Vergleich zum Referenzmodell veränderte Abflusskonzentration kommt es in der Variante 4b in beiden Modellgebieten zu starken Abweichungen bzgl. der Gefährdungsaussage. Die Ursachen hierfür sind je nach Modellgebiet verschieden.

Im flachen Modellgebiet 1 begründet sich der Unterschied allein durch die fehlenden Wasserstände im Innenhofbereich. Die Wasserstände im Straßenraum werden in der Variante 4b nicht beeinflusst. Dies begründet sich durch den hohen Anteil der unterirdischen Zuflüsse des umliegenden Einzugsgebiets, die in der Hauptsache für den Überstau in Modellgebiet 1 verantwortlich sind.

Im steileren Modellgebiet 2 liegt die Ursache in den stark reduzierten Hangabflüssen infolge fehlender direkter Beregnung des Oberflächenmodells. Diese wirken sich sowohl auf die Wasserstände in der Hanglage als auch in der Talsohle deutlich aus.

Für steilere Gebiete und bei Bedarf an differenzierten Informationen außerhalb des Straßenraums, ist eine direkte Beregnung des Oberflächenmodells (außerhalb der Dachflächen) zur Abbildung der Hangabflüsse unbedingt notwendig. In sehr flachen, von starkem Rückstau geprägten Modellgebieten führt die hydrologische Abflusskonzentration zu einer Verschärfung des berechneten Rück- und Überstaus. Außerdem werden Hofflächen, die im Referenzmodell mit hohen Wasserständen belegt sind, aufgrund der fehlenden direkten Beregnung nicht identifiziert.

Im Vergleich zu Variante 4a wird die dortige starke Überschätzung von Kanaleintritt und Kanalaustritt an den Schächten durch die in Variante 4b implementierten Hof- und Straßenabläufe deutlich gemindert.

### 5.2.5 Einfluss der Oberflächenrauheit (Variante 5)

Variante 5 dient der Untersuchung der Sensitivität der Simulationsergebnisse gegenüber den vom Referenzmodell abweichenden Oberflächenrauheiten. Dabei soll die Spanne an Sensitivitäten durch die Betrachtung zweier extremer Konfigurationen (V5a - glatt und V5b - rau) sowie der Einfluss eines über das Gebiet gemittelten Ansatzes zur Oberflächenrauheit (V5c) untersucht werden. Nachfolgend werden die Auswirkungen der 3 Varianten untereinander und im Vergleich zum Referenzmodell untersucht.

#### ***Veränderungen im Modell durch die Varianten 5a, 5b und 5c***

In Variante 5a wird flächendeckend eine glatte Oberflächenrauheit ( $\cong$  Asphalt), in Variante 5b eine raue Oberflächenrauheit ( $\cong$  Gras) angesetzt. In Variante 5c wird eine gemittelte Oberflächenrauheit basierend auf Katasterinformationen flächendeckend angesetzt. Die Konfigurationen sind in Kapitel 4.4.5 näher beschrieben. Damit unterscheiden sich alle drei Varianten hinsichtlich des Ansatzes der Oberflächenrauheit deutlich von der teilflächenspezifischen Ansatzwahl im Referenzmodell.

#### ***Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse***

In Modellgebiet 1 kommt es zu minimal höheren Wasserständen bei rauher Oberfläche und minimal geringeren Wasserständen bei glatter Oberfläche. Der gemittelte Ansatz führt zu einer leicht erhöhten Rauheit im Straßenraum und damit auch zu minimal erhöhten Wasserständen in diesem Bereich.

Auch in Modellgebiet 2 ist der prinzipielle Zusammenhang zwischen Rauheit und Wasserstand analog zu Modellgebiet 1 erkennbar. Hier wird noch ein weiterer Effekt durch den Ansatz einer flächendeckend konstanten Rauheit, wie er in den Varianten 5a, b und c gewählt wird, sichtbar:

Durch die flächenspezifischen Ansätze im Referenzmodell wird auch in geringem Maße die Abflussrichtung beeinflusst. So kommt es in Bereichen, in denen Flächen unterschiedlicher Rauheit aufeinandertreffen, tendenziell eher zu einer Abflussführung im glatteren Bereich oder in Richtung des glatteren Bereichs.

Dies zeigt der Vergleich zwischen dem Referenzmodell und den Varianten im Bereich der Landstraße im Norden von Modellgebiet 2. In den Varianten kommt es im Vergleich zum Referenzmodell zu einem stärkeren Übertritt von Abfluss der Landstraße in südliche Richtung zu den tieferliegenden Bereichen der Souterrainwohnungen. Im Referenzmodell ist die Oberflächenrauheit im Bereich der Straße geringer als neben der Straße. Der Abfluss wird länger im Straßenraum gehalten. In den Varianten ist die Rauheit sowohl innerhalb der Straße als auch daneben einheitlich und es kommt zu einem verstärkten Übertreten von Wasser aus der Straße in Richtung der tieferliegenden Bereiche mit Souterrainwohnungen.

Durch das genannte Phänomen kommt es im Vergleich zum Referenzmodell im Bereich der tieferliegenden Souterrainwohnungen von Modellgebiet 2 in den Varianten 5a, b und c prinzipiell zu höheren Wasserständen. Es zeigen sich in den Varianten die gleichen tendenziellen Effekte wie in Modellgebiet 1. Der Einfluss der Oberflächenrauheit ist in Modellgebiet 2 aufgrund der steileren Topografie und der geringeren Rückstauproblematik ausgeprägter.

#### ***Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche***

In Modellgebiet 1 verändert sich die maximale Wassermenge auf der Oberfläche analog der bereits festgestellten Beziehung zwischen Wasserstand und Rauheit. In Variante 5a (glatt) nimmt die maximale Wassermenge auf der Oberfläche minimal ab. In Variante 5b (rau) nimmt sie leicht zu. Die Spanne zwischen „glatt“ und „rau“ liegt bei 6,3 Prozentpunkten. In Modellgebiet 2 treten vergleichbare Effekte auf. Die Spanne zwischen „glatt“ und „rau“ liegt hier bei 5,7 Prozentpunkten. In beiden Gebieten führt eine höhere Oberflächenrauheit zu einer Verschiebung des Zeitpunkts der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche um wenige Minuten nach hinten.

#### ***Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Auch die Summenindikatoren zur wasserstandbedingten Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung verhalten sich analog zu den festgestellten Tendenzen. Bei der flächenbezogenen Gefahr ist die Ausprägung in Modellgebiet 2 sehr viel größer als in Modellgebiet 1. In Modellgebiet 1 verändert sich die gebäudebezogene Gefährdung kaum. Auch hier ist die Ausprägung in Modellgebiet 2 größer.

Tabelle 5-14: Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und den Varianten zur Oberflächenrauheit für beide Modellgebiete

	Modellgebiet 1				Modellgebiet 2			
	Ref	V5a glatt	V5b rau	V5c MW	Ref	V5a glatt	V5b rau	V5c MW
Max. Wassermenge Oberfläche [m³]	4.795	4.776	5.076	4.825	5.008	5.050	5.337	5.205
		-0,4%	+5,9%	+0,6%		+ 0,8%	+6,6%	+3,9%
Zeitpunkt max. Wassermenge Oberfläche [min]	110	110	112	110	52	52	55	53
		+0,0%	+1,8%	+0,0%		+ 0,0%	+5,8%	+1,9%
SI Gefahr Wasserstand [m²×#GK]	21.842	21.650	23.351	21.953	21.747	22.029	25.340	23.917
		-0,9%	+6,9%	+0,5%		+ 1,3%	+16,5%	+10,0%
SI Gefährdung Wasserstand [n <sub>Geb</sub> ×#GK]	54	54	55	54	573	578	594	580
		+0,0%	+1,9%	+0,0%		+ 0,9%	+3,7%	+1,2%
Geb.kantenl. GK 2-4 [m]	350	343	355	343	1.938	1.935	2.219	2.084
		-2,0%	+1,4%	-2,0%		- 0,2%	+14,5%	+7,5%
Betr. Gebäudefläche [m²]	50	49	51	49	710	714	790	754
		-2,0%	+2,0%	-2,0%		+ 0,6%	+11,3%	+6,2%
SI Gefahr FG [m²×#GK]	4.959	5.005	2.670	4.598	10.232	10.359	6.781	8.675
		+0,9%	-46,2%	-7,3%		+ 1,2%	-33,7%	-7,3%
SI Gefährdung FG [n <sub>Geb</sub> ×#GK]	8	9	6	8	260	263	131	176
		+12,5%	-25,0%	+0,0%		+ 1,2%	-49,6%	-32,3%

### ***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Einen sehr viel deutlicheren Einfluss haben die Varianten 5a, 5b und 5c auf die Fließgeschwindigkeit. Wie zu erwarten, nehmen die Fließgeschwindigkeiten mit Abnahme der Oberflächenrauheit zu. Dies zeigt sich deutlich in den Werten der Summenindikatoren zur fließgeschwindigkeitsbedingten Gefahr und Gefährdung. Die Spanne zwischen „glatt“ und „rau“ liegt für die fließgeschwindigkeitsbedingte Gefahr in Modellgebiet 1 bei 47 Prozentpunkten. In Modellgebiet 2 treten vergleichbare Effekte auf. Die Spanne zwischen „glatt“ und „rau“ liegt hier leicht erhöht bei 50 Prozentpunkten.

### ***Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten***

Die veränderten Oberflächenrauheiten in den Varianten 5a, 5b und 5c haben nur geringe Auswirkungen auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten. Der Vergleich zum Referenzmodell in Abbildung 5-27 zeigt Abweichungen im einstelligen Prozentbereich.

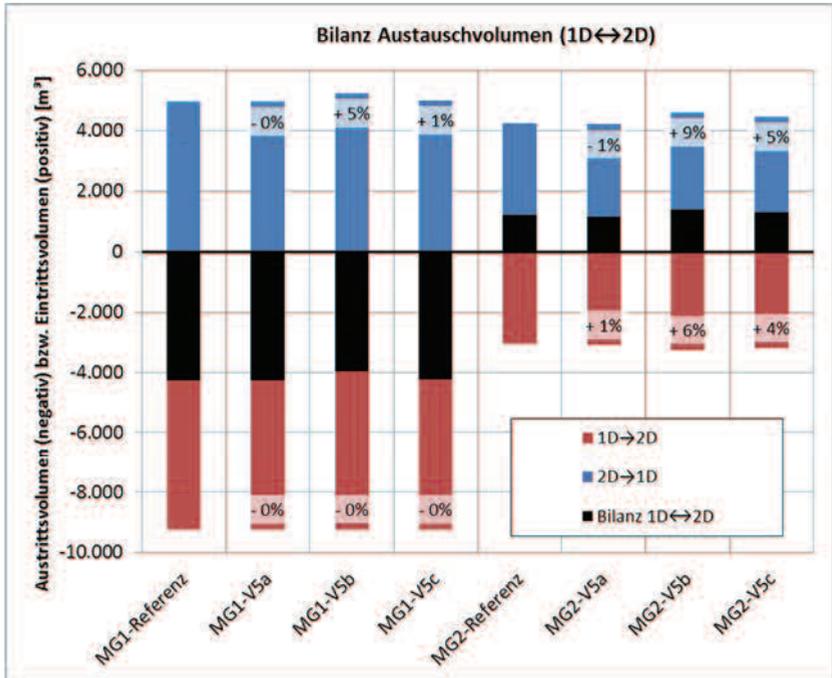


Abbildung 5-28: Bilanz des Austauschvolumens für Referenzzustand und Varianten 5a, 5b und 5c in beiden Modellgebieten

### Bewertung

Der zu erwartende Zusammenhang zwischen zunehmender Oberflächenrauheit, den gleichzeitig abnehmenden Fließgeschwindigkeiten und dem Ansteigen der Wasserstände ist in den Simulationsergebnissen deutlich festzustellen. Besonders hinsichtlich der Wasserstände ist der Zusammenhang in Modellgebiet 2 ausgeprägter als in Modellgebiet 1. Durch eine teilflächenscharfe bzw. eine gemittelte Oberflächenrauheit über die Fläche können Abflusswege beeinflusst werden.

Der Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Simulationsergebnisse und die Gefährdungsaussage ist zumindest im steileren und weniger von Rückstau geprägten Modellgebiet 2 nicht zu vernachlässigen. Hier ist eine möglichst detailgetreue und teilflächenscharfe Abbildung der Oberflächenrauheit zu empfehlen. Dies gilt insbesondere bei Auswertung der Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung aufgrund von Fließgeschwindigkeiten.

### **5.2.6 Einfluss unterschiedlicher Abflussbildungsansätze (Variante 6)**

Variante 6 dient der Untersuchung der Sensitivität der Simulationsergebnisse gegenüber den vom Referenzmodell abweichenden Abflussbildungsansätzen. Dabei wird die Spanne an Sensitivitäten durch die Betrachtung einer extremen Konfiguration ohne Abflussbildungsverluste (V6a) sowie der Einfluss eines über das Gebiet gemittelten Ansatzes zum Abflussbildungsansatz untersucht. Nachfolgend werden die Auswirkungen der beiden Varianten im Vergleich zum Referenzmodell untersucht.

#### ***Veränderungen im Modell durch die Varianten 6a und 6b***

In Variante 6a sind jegliche Verlustansätze (Abflussbeiwerte, Versickerungsansätze) als vorbereitende Untersuchung für Variante 6b entfernt. In Variante 6b sind die Abflussbildungsansätze aus den Referenzmodellen flächengemittelt und konstant über das gesamte Gebiet angesetzt. Die Konfigurationen sind in Kapitel 4.4.6 näher beschrieben.

Durch die fehlenden Verluste in Variante 6a nimmt das Niederschlagsabflussvolumen in beiden Modellgebieten bei gleichzeitigem Wegfall des Versickerungsansatzes erheblich zu. So kommt in Modellgebiet 2 im Vergleich zum Referenzmodell über die gesamte simulierte Zeit die doppelte Wassermenge zum Abfluss oder verbleibt in der Fläche. In Modellgebiet 1 sind die Verlustansätze aufgrund der ausgeprägten Flächenversiegelung und der fehlenden Außengebiete weit geringer. Entsprechend ist der Unterschied zwischen Referenzmodell und Variante gering. In Modellgebiet 1 nimmt die Menge an Wasser, die zum Abfluss kommt bzw. die in der Fläche verbleibt, im Vergleich zum Referenzmodell um 35% zu.

Durch die flächengewichtete Mittelung der Verlustansätze (Variante 6b) kommt es in Modellgebiet 1 im Straßenraum zu einer Erhöhung und im Hofbereich zu einer Verringerung der Verlustansätze. Da sich der Großteil der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche in den Straßenflächen konzentriert, kommt es insgesamt zu einem Anstieg der Verluste gegenüber dem Referenzmodell. Die Wassermenge, die zum Abfluss kommt bzw. in der Fläche verbleibt, reduziert sich hier deutlich. In Modellgebiet 2 kommt es in Variante 6b im Vergleich zum Referenzmodell zu höheren Verlustansätzen im Siedlungsbereich und geringeren Verlustansätzen im Außengebiet. Insgesamt verändert sich die Wassermenge, die zum Abfluss kommt bzw. in der Fläche verbleibt, nur minimal gegenüber dem Referenzmodell.

#### ***Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche***

In beiden Modellgebieten erhöht sich die maximale Wassermenge auf der Oberfläche in Variante 6a deutlich. In Modellgebiet 2 ist der Effekt sehr viel stärker. Hier kommt es zu einer Verdopplung der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche. In beiden Modellgebieten nimmt die maximale Wassermenge auf der Oberfläche

durch den gemittelten Verlustansatz über die Fläche ab. Der Zeitpunkt der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche verschiebt sich in Modellgebiet 1 für Variante 6a zeitlich leicht nach vorne, in Variante 6b bleibt er gleich. In Modellgebiet 2 verschiebt er sich in beiden Varianten deutlich nach hinten.

Tabelle 5-15: Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und in den Varianten 6a und 6b für beide Modellgebiete

	Modellgebiet 1			Modellgebiet 2		
	Ref	V6a	V6b	Ref	V6a	V6b
<b>Max. Wassermenge Oberfläche [m<sup>3</sup>]</b>	4.795	5.496	4.512	5.008	10.109	3.247
		+ 14,6%	- 5,9%		+ 101,8%	- 35,2%
<b>Zeitpunkt max. Wassermenge Oberfläche [min]</b>	110	108	110	52	60	55
		- 1,8%	+ 0,0%		+ 15,4%	+ 5,8%
<b>Summenindikator Gefahr (Wasserstand) [m<sup>2</sup>×#GK]</b>	21.842	25.386	20.458	21.747	33.280	15.033
		+ 16,2%	- 6,3%		+ 53,0%	- 30,9%
<b>Summenind. Gefährdung (Wasserstand) [n<sub>Geb</sub>×#GK]</b>	54	70	55	573	651	495
		+ 29,6%	+ 1,9%		+ 13,6%	- 13,6%
<b>Gebäudekantenlänge GK 2-4 [m]</b>	350	656	389	1.938	2.266	1.609
		+ 87,5%	+ 11,1%		+ 16,9%	- 17,0%
<b>Betroffene Gebäudefläche [m<sup>2</sup>]</b>	50	98	55	710	1.157	527
		+ 96,0%	+ 10,0%		+ 63,0%	- 25,8%
<b>Summenindikator Gefahr (Fließgeschw.) [m<sup>2</sup>×#GK]</b>	4.959	5.880	3.959	10.232	19.074	7.151
		+ 18,6%	- 20,2%		+ 86,4%	- 30,1%
<b>Summenind. Gefährdung (Fließgeschw.) [n<sub>Geb</sub>×#GK]</b>	8	15	9	260	338	205
		+ 87,5%	+ 12,5%		+ 30,0%	- 21,2%

### ***Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Der Vergleich der Gefährdungskarten zeigt in Modellgebiet 1 deutlich höhere Wasserstände im gesamten Gebiet für Variante 6a (siehe Anhang A.1.29). In den Hofbereichen ist der Effekt ausgeprägter als im Straßenraum. Der Summenindikator Gefahr nimmt deutlich zu. Aufgrund der zunehmenden Wasserstände im Hofbereich steigen auch die Gefährdungsindikatoren sehr stark an.

In Variante 6b in Modellgebiet 1 verändern sich die Wasserstände entsprechend der flächenbezogenen Veränderung der Verlustansätze. Im Straßenraum steigt der Verlustansatz durch die Mittelung über das Gesamtgebiet. Entsprechend nehmen hier die Wasserstände in Variante 6b gegenüber dem Referenzzustand ab. In den Hofbereichen verhält es sich gegenläufig. Die Veränderung des Summenindikators Gefahr gegenüber dem Referenzmodell ist negativ, da hier in Summe die Abnahme der Wasserstände im Straßenraum gegenüber der Zunahme der Wasserstände im Hofbereich überwiegt. Die Gefährdung nimmt jedoch zu, da die Veränderung in den Hofbereichen die Gefährdungsaussage stärker beeinflusst als die Veränderung im Straßenraum.

In Modellgebiet 2 zeigt der Vergleich der Gefährdungskarten für Variante 6a eine starke Zunahme der Wasserstände in den tieferliegenden Bereichen der Souterrainwohnungen und der gesamten Talsohle (siehe Anhang A.2.29). Auch das Rückhaltebecken vor der Sperrmauer im Nordosten des Gebiets füllt sich im Verlauf des Ereignisses komplett und läuft infolgedessen in die bebaute Talsohle über. Die Summenindikatoren Gefahr und Gefährdung nehmen entsprechend drastisch zu.

In Variante 6b kommt es durch die Mittelung zu einer Abnahme der Verluste im Außengebiet und zu einer Zunahme im Siedlungsgebiet. Entsprechend verändern sich die Wasserstände gegenüber dem Referenzmodell. Im Außengebiet nehmen die Wasserstände zu, im Siedlungsgebiet deutlich ab. Da die Werte der Summenindikatoren für das Siedlungsgebiet gebildet werden, ist hier eine deutliche Abnahme zu verzeichnen.

### ***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsfährdung***

Durch die Änderung der Verlustansätze wird auch die Fließgeschwindigkeit stark beeinflusst. In Variante 6a nehmen die Indikatoren zu Gefahr und Gefährdung aufgrund des zunehmenden Abflussaufkommens deutlich zu. Durch den Ansatz eines flächendeckenden, gemittelten Verlustansatzes in Variante 6b nehmen die Fließgeschwindigkeiten in beiden Gebieten ab. In Modellgebiet 2 kommt es durch den höheren Verlustansatz im Siedlungsgebiet zu geringeren Abflüssen und zu geringeren Fließgeschwindigkeiten. In Modellgebiet 1 treten die relevanten Fließgeschwindigkeiten vorwiegend im Straßenraum auf. Durch die größeren Verlustansätze im Straßenraum infolge des gemittelten, flächendeckenden Ansatzes kommt es hier zudem zu einer Verringerung der Abflüsse und damit zu einer Verringerung der Fließgeschwindigkeiten. Die Veränderung der Indikatoren im Vergleich zum Referenzmodell ist für beide Varianten in Modellgebiet 2 stärker ausgeprägt als in Modellgebiet 1.

### ***Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten***

Der Einfluss der veränderten Verlustansätze auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten verhält sich analog zu der Beeinflussung der Wasserstände.

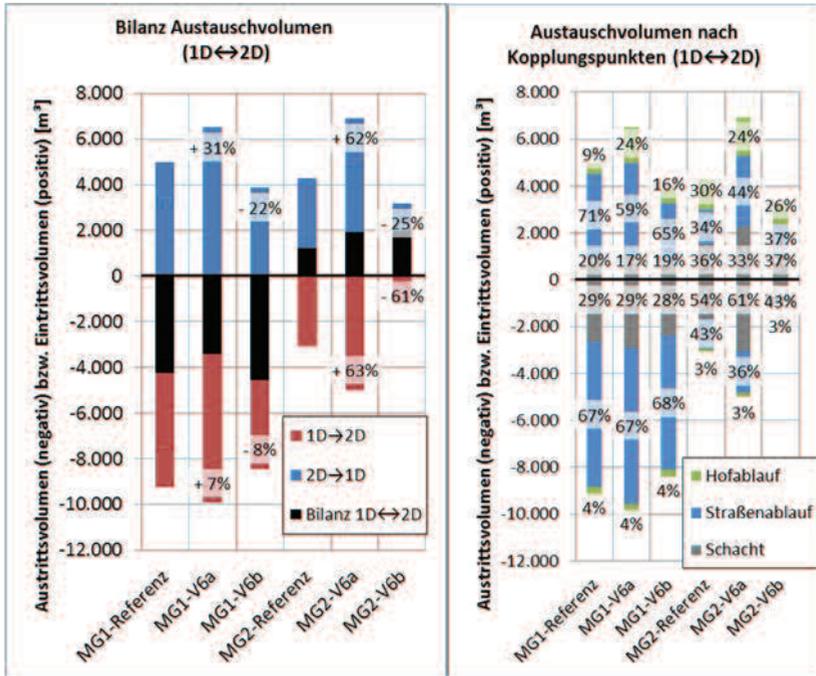


Abbildung 5-29: Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Varianten 6a und 6b in beiden Modellgebieten

### Bewertung

Die Vernachlässigung von Verlustansätzen in Variante 6a hat drastische Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse. In Modellgebiet 1 besteht die Hauptauswirkung in der stärkeren Belastung der Hofbereiche durch den Wegfall der dortigen Verlustansätze. Dadurch kommt es zu beträchtlichen Veränderungen in der Gefährdungsaussage. In Modellgebiet 2 kommt es zu einem sehr starken Anstieg der Wasserstände in der Talsohle und einem deutlichen Anstieg der Abflüsse in den Außengebieten.

Die Ergebnisse in Variante 6b zeigen, dass die räumlich differenzierte Abbildung von Verlustansätzen einen deutlichen Einfluss auf die Modellergebnisse hat. In Modellgebiet 1 kommt es infolgedessen zu einer Verlagerung der maximalen Wasserstände vom Straßenraum in den Hofbereich. In Modellgebiet 2 ist gegenüber dem Referenzzustand, trotz der insgesamt vergleichbaren Verlusthöhen, eine deutliche Verlagerung der maximalen Wasserstände vom Siedlungsbereich in die Außengebiete zu erkennen.

Es ist eine drastische Beeinflussung der Simulationsergebnisse durch die Veränderung des Verlustansatzes zu beobachten. Somit ist auch bei geringeren Veränderungen des Verlustansatzes eine relevante Beeinflussung zu vermuten. Die Ergebnisse zeigen die große Relevanz einer geeigneten Ansatzwahl zu den Abflussverlusten. Um dem Anspruch gerecht werden zu können, hochaufgelöste Aussagen zur Gefährdungslage ableiten zu können, ist ein teilflächenspezifischer, hochaufgelöster Ansatz zu den Abflussverlusten notwendig. In Modellgebiet 2 begründet sich dies durch das große Einzugsgebiet. In Modellgebiet 1 kann es durch den Ansatz der direkten Berechnung innerhalb der durch die Blockrandbebauung abgegrenzten Hofflächen zu relevanten Einflüssen auf die dortigen Wasserstände bei einer Unterschätzung der lokalen Verlustansätze kommen.

### **5.2.7 Einfluss der unterschiedlichen Modellierung von Oberflächenstrukturen (Variante 7)**

In Variante 7 wird die Sensitivität der Simulationsergebnisse gegenüber unterschiedlichen Ansätzen zur Modellierung von Oberflächenstrukturen untersucht. Betrachtet werden unterschiedliche Ansätze zur Modellierung von Bordsteinkanten durch Bruchkanten und Mauern (Varianten 7a bis 7d) sowie der Effekt einer Vertiefung des Oberflächenmodells im Bereich von Straßen (Variante 7e).

#### **5.2.7.1 Variante 7a bis 7d: Einfluss unterschiedlicher Ansätze zur Modellierung von Bordsteinkanten**

##### **Veränderungen im Modell durch die Varianten 7a bis 7d**

Im Referenzmodell werden die Bordsteinkanten über die Definition zweier parallel zueinander verlaufender Bruchkanten abgebildet. Wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben sind die Bruchkanten mit jeweils 25cm Abstand auf beiden Seiten der Bordsteinkante angeordnet.

In Variante 7a werden keine Bruchkanten zur Präzisierung der Lage der Bordsteinkanten implementiert.

In Variante 7b wird die Lage der Bordsteinkanten durch die Definition einer einzelnen Bruchkante entlang der Bordsteinkante definiert.

In Variante 7c werden wie im Referenzmodell zwei versetzte, parallele Bruchkanten angesetzt. Der Abstand zwischen den Bruchkanten wird aber auf 10 cm verringert. Entsprechend reduziert sich der jeweilige Abstand zur Bordsteinkante auf 5 cm.

In Variante 7d werden entlang der Bordsteinkanten Mauern mit einer Höhe von 10 cm definiert. So entstehen im Oberflächenmodell entlang der Bordsteinkante li-

nienförmige Mauern, die eine klare Abgrenzung zwischen Gehweg und Straße bewirken. Der mögliche Abfluss vom Gehweg auf die Straße wird dadurch voraussichtlich stark eingeschränkt.

### **Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse**

In Variante 7a kommt es durch die fehlende Definition einer Bruchkante, wie vermutet, zu einer weniger ausgeprägten Abbildung der Bordsteinkante. Der Effekt zeigt sich in Modellgebiet 2 durch eine Verlagerung von Wasserständen im Hangbereich. Besonders deutlich wird er auch an der Landstraße im Norden des Gebiets. Hier kommt es bereits sehr viel weiter nördlich, hangaufwärts zu einem Übertritt des Wassers über die Landstraßenbegrenzung und in der Folge zu einem erhöhten Zufließen zum Rückhaltebecken vor der Sperrmauer. Dadurch erhöhen sich die Wasserstände im Rückhaltebecken und nehmen hinter der Sperrmauer ab. Die Folge ist eine Abnahme der Wasserstände in der Talsohle innerhalb des Siedlungsgebiets.

In Modellgebiet 1 zeigt sich dieser Effekt im nordwestlichen Teil des Gebiets, in dem Wasser von der Straße in eine Tieflage im Gehwegbereich zufließt sowie im Süden des Gebiets, in dem Wasser von der Straße dem tiefliegenden Hauseingang zufließt. Die übrigen minimalen Unterschiede der Gefährdungskarte (siehe Anhang A.1.1 und A.1.33) haben ihre Ursache in der veränderten Zusammensetzung des Oberflächenmodells infolge eines abweichenden Dreiecksnetzes.

Die einzelne Bruchkante in Variante 7b führt bereits zu einer verbesserten Abbildung der Bordsteinkante. Sie ist aber immer noch nicht so markant wie unter Verwendung der Doppelbruchkante im Referenzmodell. In Modellgebiet 1 sind, wenn auch nicht ganz so ausgeprägt, erneut die gleichen Vorgänge zu beobachten wie in Variante 7a. In Modellgebiet 2 kommt es im Bereich der Hanglage zu einer Annäherung an den Zustand des Referenzmodells. In der Talsohle nehmen die Wasserstände im Vergleich zum Referenzmodell noch weiter ab als in Variante 7a. Dies liegt daran, dass, wie in Variante 7a, Wasser aus der Landstraße weiter nördlich bzw. hangaufwärts in Richtung des Rückhaltebeckens übertritt. Zusätzlich ist die Begrenzung der Landstraße im Bereich der Souterrainwohnungen stärker profiliert als in Variante 7a. Infolgedessen ist im Vergleich zum Referenzmodell weniger Abfluss auf der Landstraße erkennbar, im Bereich der Souterrainwohnungen wird dieser aber stärker in der Straße gehalten als in Variante 7a.

Die enge Doppelbruchkante in Variante 7c führt in Modellgebiet 2 durch die ausgeprägter abgebildete Bordsteinkante wieder zu einem Anstieg der Wasserstände im Souterrainbereich innerhalb des Siedlungsgebiets. Dies begründet sich darin, dass mehr Abfluss entlang der Landstraße gehalten wird, der dann im Souterrainbereich in Richtung der Tieflage übertritt. In Modellgebiet 1 reduziert sich der Wasserstand am tiefliegenden Hauseingang wieder.

In Variante 7d führen die 10 cm hohen „Mauern“, die im Modell im Bereich der Bordsteinkanten implementiert sind, zu einer strengeren Führung des Abflusses innerhalb oder außerhalb des Straßenraums. Gut zu erkennen ist dieser Effekt im Bereich der Landstraße in Modellgebiet 2. Hier sind Wasserstände an den modellierten Mauern im Bereich der Bordsteinkanten auf beiden Seiten der Straße zu erkennen. Die Wasserstände im Souterrainbereich nehmen deutlich ab, da der von Norden kommende Abfluss, der im Referenzmodell über die Landstraße hinweg fließt sowie der von Süden kommende Abfluss, der im Referenzmodell über die senkrecht zur Hangneigung verlaufende Straße in der Gebietsmitte hinweg fließt behindert und Richtung Tieflage im Westen des Gebietes umgeleitet werden.

In Modellgebiet 1 kommt es im Vergleich zum Referenzmodell zu höheren Wasserständen am tiefliegenden Hauseingang im Süden des Gebiets. Grund hierfür ist, dass sich der Abfluss gehwegseitig hinter der als 10cm hohe Mauer modellierten Bordsteinkante aufstaut und dem Hauseingang zuläuft. Darüber hinausgehend sind kaum Veränderungen in Modellgebiet 1 erkennbar.

### ***Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten***

Wie das Säulendiagramm in Abbildung 5-30 zeigt, ändert sich die Bilanz des Austauschvolumens an den Kopplungspunkten in den Varianten 7a bis 7d nur geringfügig. Lediglich für Variante 7c und 7d ist ein Anstieg des Kanaleintritts in Modellgebiet 2 zu erkennen, was auf die stärkere Profilierung der Bordsteinkanten zurückzuführen ist. Durch die stärkere Profilierung konzentriert sich der Abfluss stärker an der Bordsteinkante, an der sich auch die Straßenabläufe befinden.

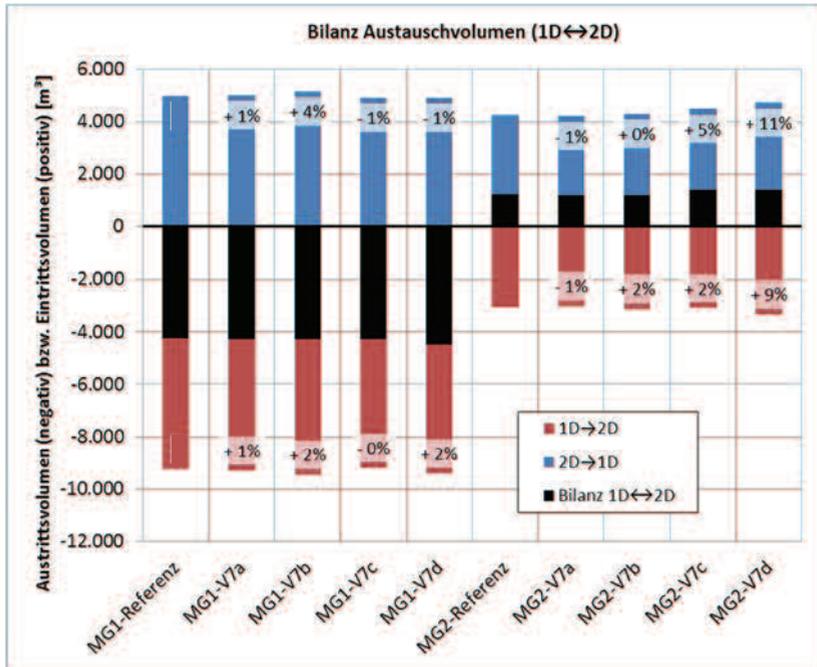


Abbildung 5-30: Bilanz des Austauschvolumens für Referenzzustand und Varianten 7a bis 7d in beiden Modellgebieten

Diesen Schluss lässt auch der für die genannten Varianten in Modellgebiet 2 steigende Anteil der Straßenabläufe am gesamten Kanaleintritt zu (siehe Abbildung 5-31).

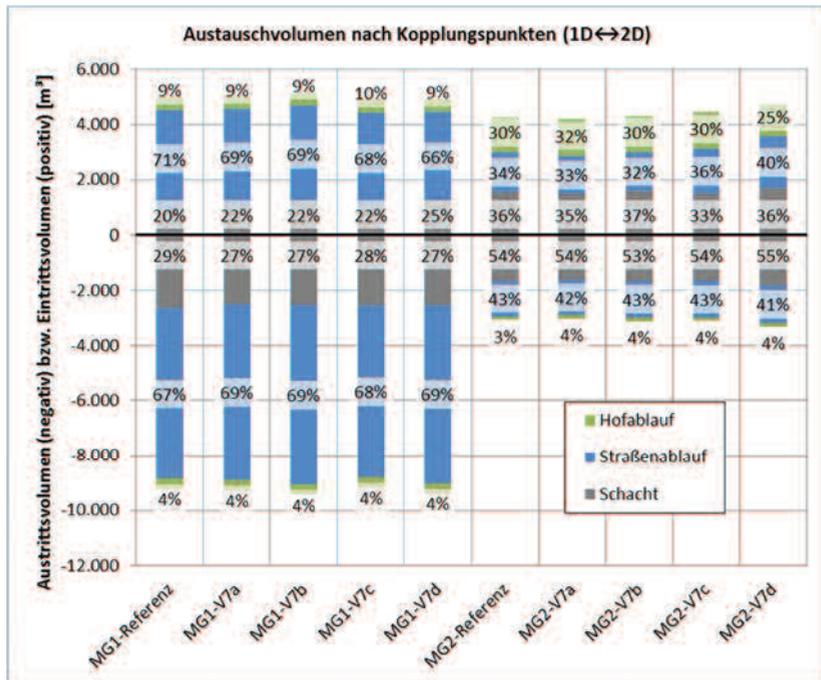


Abbildung 5-31: Bilanz des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten für Referenzzustand und Varianten 7a bis 7d in beiden Modellgebieten

### Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche

Die maximale Wassermenge auf der Oberfläche ändert sich in Modellgebiet 1 in den Varianten 7a bis 7c nur geringfügig. In Variante 7d ist ein kleiner Anstieg zu erkennen, der auf die leicht erhöhten Wasserstände hinter der Bordsteinkante zurückzuführen ist. In Modellgebiet 1 sind in den Varianten 7a und 7b leichte Abnahmen der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche innerhalb des Siedlungsgebiets infolge der geringeren Überflutung des nördlichen Bereichs mit Souterrainwohnungen festzustellen. In den Varianten 7c und 7d sind die Veränderungen nur geringfügig.

Der Zeitpunkt der maximalen Überflutung verschiebt sich in beiden Gebieten geringfügig bis gar nicht.

Tabelle 5-16: Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und den Varianten 7a bis 7d für beide Modellgebiete

	Modellgebiet 1					Modellgebiet 2				
	Ref	V7a keine BK	V7b eine BK	V7c enge BK	V7d walls 10cm	Ref	V7a keine BK	V7b eine BK	V7c enge BK	V7d walls 10cm
<b>Max. Wassermenge Oberfläche [m<sup>2</sup>]</b>	4.795	4.736	4.737	4.819	4.942	5.008	4.809	4.801	4.996	4.935
		-1,2%	-1,2%	+0,5%	+3,1%		-4,0%	-4,1%	-0,3%	-1,5%
<b>Zeitpunkt max. Wassermenge Oberfläche [min]</b>	110	109	109	110	109	52	52	52	52	51
		-0,9%	-0,9%	+0,0%	-0,9%		+0,0%	+0,0%	+0,0%	-1,9%
<b>SI Gefahr Wasserstand [m<sup>2</sup>×#GK]</b>	21.842	21.354	21.399	21.920	22.178	21.747	21.016	20.817	21.889	20.856
		-2,2%	-2,0%	+0,4%	+1,5%		-3,4%	-4,3%	+0,7%	-4,1%
<b>SI Gefährdung Wasserstand [n<sub>Geb</sub>×#GK]</b>	54	53	54	53	55	573	552	566	573	540
		-1,9%	+0,0%	-1,9%	+1,9%		-3,7%	-1,2%	+0,0%	-5,8%
<b>Geb.kantenl. GK 2-4 [m]</b>	350	348	336	363	333	1.938	1.854	1.879	1.908	1.748
		-0,6%	-4,0%	+3,7%	-4,9%		-4,3%	-3,0%	-1,5%	-9,8%
<b>Betr. Gebäudefläche [m<sup>2</sup>]</b>	50	50	48	53	48	710	674	687	707	642
		+0,0%	-4,0%	+6,0%	-4,0%		-5,1%	-3,2%	-0,4%	-9,6%
<b>SI Gefahr FG [m<sup>2</sup>×#GK]</b>	4.959	4.725	5.278	4.751	5.053	10.232	9.645	9.869	10.364	11.133
		-4,7%	+6,4%	-4,2%	+1,9%		-5,7%	-3,5%	+1,3%	+8,8%
<b>SI Gefährdung FG [n<sub>Geb</sub>×#GK]</b>	8	8	8	9	6	260	250	260	244	221
		+0,0%	+0,0%	+12%	-25%		-3,8%	+0,0%	-6,2%	-15%

### ***Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Die Summenindikatoren zur wasserstandbedingten Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung verändern sich kaum. In Modellgebiet 2 ist insgesamt gesehen ein etwas höherer Einfluss der Varianten 7a bis 7d auf die Indikatoren festzustellen als in Modellgebiet 1.

### ***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Der Einfluss der Varianten 7a bis 7d auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung ist in Modellgebiet 1 eher gering.

In Modellgebiet 2 ist ein deutlicherer Einfluss erkennbar. Anhand der Werte der Indikatoren sowie im Vergleich der Gefährdungskarten fällt auf, dass in den Varianten 7a und 7b die fließgeschwindigkeitsbedingte Gefahr aufgrund geringerer Fließgeschwindigkeiten im Straßenraum gegenüber dem Referenzmodell leicht abnimmt (siehe Anhang A.1.34 und A.1.36). Durch die stärker profilierten Bordsteinanten in den Varianten 7c und 7d kommt es zu höheren Fließgeschwindigkeiten

im Straßenraum und einer entsprechenden Zunahme der fließgeschwindigkeitsbedingten Gefahr (siehe Anhang A.1.38 und A.1.40). Gleichzeitig nimmt die gebäudebezogene Gefährdung aufgrund der Verlagerung des Abflusses in den Straßenraum ab.

### **Bewertung**

Die gezeigten unterschiedlichen Ansätze zur Modellierung der Bordsteinkanten haben einen deutlichen Einfluss auf das Abflussgeschehen und auf die objektspezifische Überflutungsgefährdung. Auf das Gesamtbild und die gebietsweite Gefährdungsaussage ist der Einfluss eher gering. Der Einfluss ist im topografisch bewegten Modellgebiet 2 größer als im flachen, rückstaugeprägten Modellgebiet 1.

Die objektspezifische Gefährdung wird mitunter deutlich beeinflusst, da die verschiedenen Modellansätze in Teilbereichen zu einer räumlichen Verlagerung von Übertritten des Oberflächenabflusses aus dem Straßenraum führen. Die Tendenz zu einer stärkeren Lenkung des Abflusses in den Straßenbereichen ist durch zunehmende Profilierung der Bordsteinkanten insbesondere im steileren Modellgebiet 2 erkennbar.

Die Modellierung der Bordsteinkante über die Mauern (Variante 7d) ist nicht zu empfehlen, da der Effekt der Abflussbehinderung von gehwegseitigen Abflüssen einen deutlichen und realitätsfernen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat.

Allgemein hängt die Modellierung der Bordsteinkanten über Bruchkanten ohne Höhenvorgabe stark von der Güte des zugrundeliegenden Geländemodells ab. Bei einer sehr hohen Modellgüte und entsprechend hoher Auflösung des Oberflächenmodells werden unter Umständen keine Bruchkanten benötigt. Bei einer sehr geringen Modellgüte liefert auch die Definition von Bruchkanten keinen Beitrag zu einer stärkeren Profilierung der Bordsteinkanten und damit des Höhenunterschieds im Bordsteinbereich.

Für die vorliegende Datengrundlage wird die Modellierung der Bordsteinkanten über den Ansatz der Doppelbruchkante wie im Referenzmodell und Variante 7c empfohlen. Der befürchtete Effekt einer starken Verringerung des Kanaleintritts durch sehr kleine Kopplungsdreiecke infolge der „engen“ Doppelbruchkante (Variante 7c) (siehe auch Kapitel 4.1.2) hat sich nicht bestätigt.

#### **5.2.7.2 Variante 7e: Absenkung der Straßen im Oberflächenmodell**

Bei geringerer Güte des zugrundeliegenden Geländemodells kann die Höhenauflösung so gering sein, dass auch mit Definition von Bruchkanten das Straßenprofil unzureichend abgebildet wird. Es existieren Vorgehensweisen bei denen für diesen Fall die Straßen nachträglich abgesenkt werden. Dabei handelt es sich um eine deutliche Manipulation des Oberflächenmodells. Besonders bei Verwendung

gekoppelter 1D/2D-Abflussmodelle ist von einer Beeinflussung auszugehen, da entsprechend das Austauschniveau der im Straßenraum befindlichen Kopplungspunkte beeinflusst wird. Die vergleichende Betrachtung von Variante 7e soll die Auswirkungen einer solchen Absenkung der Straßen um 10 cm aufzeigen. Gleichzeitig können durch die Betrachtung von Variante 7e die Möglichkeiten zur Modellierung entsprechender Maßnahmenzenarien mithilfe bi-direktional gekoppelter 1D/2D-Abflussmodelle verdeutlicht werden. Eine Absenkung von Straßen zur gezielten Leitung des Oberflächenabflusses im Überflutungsfall stellt eine Maßnahme im Rahmen von Überflutungsschutzkonzepten dar.

### ***Modellveränderungen in der Variante 7e***

In Variante 7e werden die Straßen in den Modellgebieten um 10 cm abgesenkt. Die Geländehöhen der Straßenabläufe und Schächte werden entsprechend mit abgesenkt. In Modellgebiet 2 werden die Straßen im südlichen Neubaugebiet entsprechend der dortigen Situation nur um 5 cm abgesenkt.

### ***Einfluss auf die maximale Wassermenge auf der Oberfläche***

In der Variante 7e kommt es in Modellgebiet 1 zu einem starken Anstieg der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche, in Modellgebiet 2 zu einer leichten Abnahme. Der Unterschied begründet sich durch die Lage der jeweiligen Tieflagen. In Modellgebiet 1 befinden sich die Tieflagen des Gebiets im Straßenraum, in Modellgebiet 2 im Bereich der Souterrainwohnungen im Norden des Gebiets. Infolge der Absenkung der Straßen in der Modellvariante erhöht sich in Modellgebiet 1 das „Speichervolumen“ der Tieflage, wodurch diese stärker gefüllt werden kann als im Referenzmodell. Darüber hinaus wird durch die Absenkung gewissermaßen die Rückstauenebene um 10 cm abgesenkt, wodurch es zu einem Anstieg des Kanalaustritts in der Tieflage kommt. Der Zeitpunkt der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche verschiebt sich aufgrund der größeren maximalen Wassermenge auf der Oberfläche etwas nach hinten.

In Modellgebiet 2 erhöht sich durch die Konzentration des Abflusses innerhalb der Straßen der Zufluss in die westliche Tieflage. Im Straßenbereich im Bereich der Talsohle erhöhen sich die Wasserstände infolge der Absenkung ebenfalls leicht. Wegen des fehlenden Übertritts aus der Landstraße kommt es zu einer deutlichen Abnahme der Wasserstände im nördlichen, tieferliegenden Bereich mit Souterrainwohnungen. Insgesamt nimmt die maximale Wassermenge auf der Oberfläche im Siedlungsgebiet leicht ab. Der Zeitpunkt der maximalen Wassermenge auf der Oberfläche verschiebt sich aufgrund des schnelleren Abflusstransports in den Straßenrinnen etwas nach vorne.

Tabelle 5-17: Werte der Vergleichsindikatoren im Referenzzustand und Variante 7e für beide Modellgebiete

		MG1		MG2	
		Ref	V7e	Ref	V7e
<b>Maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[m <sup>3</sup> ]	4.795	5.600	5.008	4.839
			+ 16,8%		- 3,4%
<b>Zeitpunkt maximale Wassermenge Oberfläche</b>	[min]	110	112	52	50
			+ 1,8%		- 3,8%
<b>Summenindikator Gefahr (Wasserstand)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	21.842	27.040	21.747	20.667
			+ 23,8%		- 5,0%
<b>Summenindikator Gefährdung (Wasserstand)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	54	52	573	535
			- 3,7%		- 6,6%
<b>Gebäudekantenlänge GK 2-4</b>	[m]	350	342	1.938	1.698
			- 2,3%		- 12,4%
<b>Betroffene Gebäudefläche</b>	[m <sup>2</sup> ]	50	49	710	632
			- 2,0%		- 11,0%
<b>Summenindikator Gefahr (Fließgeschwindigkeit)</b>	[m <sup>2</sup> ×#GK]	4.959	6.958	10.232	14.822
			+ 40,3%		+ 44,9%
<b>Summenindikator Gefährdung (Fließgeschwindigkeit)</b>	[n <sub>Geb</sub> ×#GK]	8	4	260	200
			- 50,0%		- 23,1%

### ***Einfluss auf die wasserstandbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

In beiden Gebieten kommt es durch die Absenkung der Straßen zu einer starken Konzentration des Oberflächenabflusses in die Straßen. Der Abfluss wird stärker innerhalb der Straßen gehalten. Dies spiegelt sich in den geringeren Werten für den Summenindikator zur wasserstandbedingten Gefährdung wider. Im Bereich von Straßen in Tieflagen kommt es zu höheren Wasserständen im Straßenraum. Aus diesem Grund nimmt der Summenindikator Gefahr in Modellgebiet 1 deutlich zu, da sich die Tieflagen hier fast ausschließlich auf den Straßenraum beschränken. Da die Gehwege, Gehweghinterkanten und Gebäude in ihrer ursprünglichen Höhe verbleiben, nimmt die Gefährdung im Gegensatz zur Gefahr nicht zu. In Modellgebiet 2 nimmt der Summenindikator Gefahr leicht ab, da hier der Anteil der Straßenfläche in der Tieflage geringer ist. Zusätzlich tritt weniger Wasser aus der Begrenzung der Landstraße aus und es kommt zu einer Reduzierung des oberirdischen Abflusses, der dem nördlichen, tieferliegenden Bereich mit Souterrainwohnungen zuläuft.

### ***Einfluss auf die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung***

Am deutlichsten lässt sich die Konzentration des oberflächigen Abflusses auf die Straßen an der Betrachtung der Fließgeschwindigkeiten ausmachen. In beiden Gebieten steigt hier die Fläche mit erhöhter Fließgeschwindigkeit erheblich an und

konzentriert sich gleichzeitig stärker auf die Straßenmitten. Entsprechend nehmen die Summenindikatoren zur fließgeschwindigkeitsbedingten Gefahr stark zu, während die Indikatoren zur Gefährdung stark abnehmen.

### **Einfluss auf das Austauschvolumen an den Kopplungspunkten**

Durch das Absenken der Straßen und die Konzentration des Hauptabflussvolumens auf die Straßen nehmen in beiden Gebieten sowohl Kanalaustritt als auch Kanaleintritt zu. Ein stärkerer Effekt ist dabei im flacheren Modellgebiet 1 zu erkennen. In beiden Gebieten wächst beim Kanaleintritt deutlich der Anteil der Straßenabläufe, während der Anteil der Hofabläufe zurückgeht. Dies ist ebenfalls auf die Abflusskonzentration und auf die höheren Wasserstände in der Straße zurückzuführen.

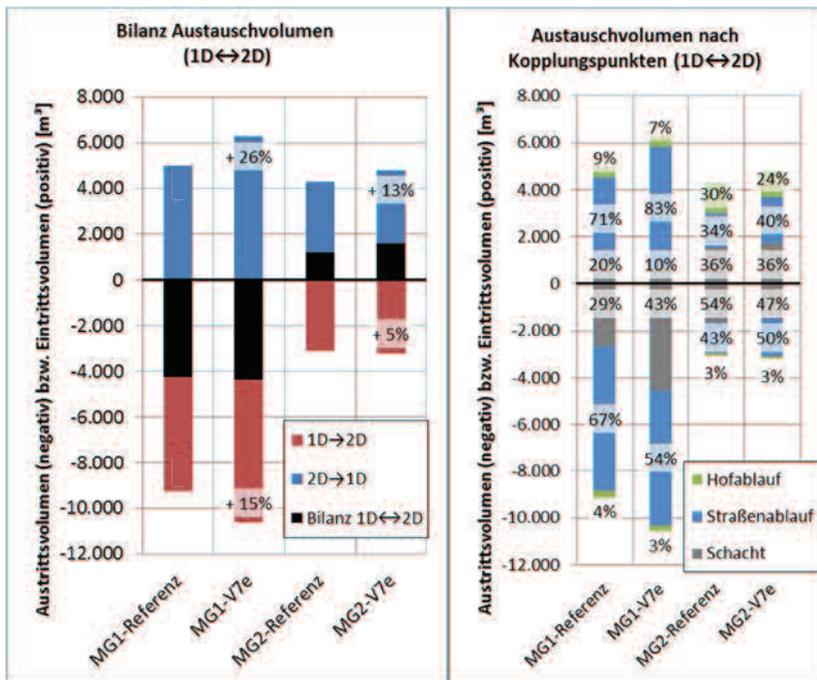


Abbildung 5-32: Bilanz des Austauschvolumens (links) und des Austauschvolumens nach Kopplungspunkten (rechts) für Referenzzustand und Variante 7e in beiden Modellgebieten

### **Bewertung**

Der Modellansatz mit einer Absenkung der Straßen führt zu einer klar definierten Abflussführung innerhalb der Straßen. Die ableitbaren Aussagen verändern sich

im Vergleich zum Referenzmodell sowohl bzgl. der gebietsweiten als auch der objektspezifischen Gefahren- und Gefährdungsaussage deutlich. Besonders groß ist die Abweichung bei der Betrachtung der Fließgeschwindigkeit. Im flachen und rückstaugeprägten Modellgebiet 1 kommt es zu deutlich höheren Wasserständen in den Straßen durch die veränderte „Rückstauenebene“. Im steileren Modellgebiet 2 kommt es zu einer starken Verlagerung der Abflusswege in den Straßenbereich. Dies führt zu einer beträchtlichen Zunahme der fließgeschwindigkeitsbedingten Gefahr, zu einer Abnahme der wasserstandbedingten Gefährdung sowie zu einer Verlagerung großer Überflutungsmengen durch den im Vergleich zum Referenzmodell fehlenden Übertritt aus der Landstraße.

Die Modellierung von abgesenkten Straßen führt für beide Gebietstypen zu starken Abweichungen in den Simulationsergebnissen und hinsichtlich der Gefahren- und Gefährdungsaussage. Bei einer geringen Güte der Höhendaten kann diese Maßnahme dazu beitragen ein klares Überflutungsbild zu liefern, in dem die Straßen als Hauptachsen des Abflustransports deutlich hervortreten. Ob dies realitätsnah und daher vertretbar ist, sollte dann sichergestellt werden. Die deutliche Einflussnahme auf Simulationsergebnisse und Gefährdungsaussage zeigt, dass bei der Implementierung Vorsicht geboten ist. Bei Vorliegen einer ausreichenden Güte der Höhendaten sollte auf diese Modellanpassung unbedingt verzichtet werden. Ist die Absenkung von Straßen im Sinne einer Maßnahme zur gezielten Abflussleitung oberflächigen Abflusses geplant, zeigt sich mittels des vorliegenden Modellsatzes eine gute Darstellbarkeit.

### 5.3 Vergleichende Betrachtung der Sensitivitäten

In einer Gesamtschau ist im Folgenden die Gegenüberstellung der Auswirkungen der Modellvarianten dargestellt. Dazu werden die Effekte auf die Indikatoren zur wasserstandbedingten und fließgeschwindigkeitsbedingten Gefahr, zur wasserstandbedingten Gefährdung sowie zum Austauschverhalten an den Kopplungspunkten verglichen. Ziel der vergleichenden Betrachtung ist es, den Einfluss der jeweiligen Varianten besser einordnen zu können, gebietspezifische Sensitivitäten zu erkennen und die Ableitung von Anwendungsempfehlungen (s. Kapitel 6) vorzubereiten.

Für eine bessere Übersicht sind in Tabelle 5-18 Kurzbeschreibungen der betrachteten Modelvarianten dargestellt.

Tabelle 5-18: Kurzübersicht der betrachteten Modellvarianten

V1 grobe Auflösung	V1a	größere Auflösung des Oberflächenmodells
V2 Abbildung Kopplungspunkt	V2a	keine Straßenabläufe, Schächte geöffnet
	V2b	keine Hofabläufe
	V2c	keine Hofabläufe, Hofflächenabfluss hydrologisch
V3 Hydraulische Abbildung Kopplungspunkt	V3a	konventionell (Wehrüberfall) Straßen- u. Hofabläufe
	V3b	keine neigungsabhängige Modellierung Straßenablauf
	V3c	Begrenzung Hof- und Straßenabläufe auf 20 l/s
	V3d	kein Herausheben der Schachtdeckel
V4 Abflusskonzentration	V4a	hydrologische Abflusskonzentration ohne Straßen- und Hofabläufe
	V4b	hydrologische Abflusskonzentration mit Straßen- und Hofabläufen
V5 Oberflächenrauheit	V5a	hydraulisch glatt
	V5b	hydraulisch rau
	V5c	gemittelt über Gesamtgebiet
V6 Abflussbildung	V6a	ohne Verlustansätze
	V6b	gemittelt über Gesamtgebiet
V7 Bordsteinkante	V7a	keine Bruchkanten
	V7b	einzelne Bruchkante
	V7c	enge Doppelbruchkante
	V7d	"wall" mit 10cm Höhe
V7 Absenkung Straße	V7e	Absenkung des Oberflächenmodells im Straßenraum um 10cm

### **Wasserstandbedingte Gefahr**

In Abbildung 5-33 und Abbildung 5-34 sind die Werte des Vergleichsindikators „wasserstandbedingte Überflutungsgefahr“ für beide Modellgebiete in den betrachteten Varianten dargestellt.

Hohe Auswirkungen auf den Indikator haben in beiden Gebieten Veränderungen der Abflusskonzentration (V2c und V4ab), sowie der Oberflächenrauheit (V5b) und der Abflussbildung (V6ab).

Im flachen Modellgebiet 1 kommt es darüber hinaus durch eine größere Auflösung des Oberflächenmodells (V1) und durch die Absenkung des Oberflächenmodells im Straßenbereich (V7e) zu einer deutlichen Zunahme der Wasserstände. Im steileren Modellgebiet 2 ist die Veränderung nur gering.

Der Blick auf die aus den Berechnungsergebnissen erzeugte Gefährdungskarte zeigt auch in Modellgebiet 2 deutliche Unterschiede in Variante 1 (siehe Anhang A.2.1 und A.2.3). Zwar ist die Flächengröße je Gefahrenklasse in Referenzmodell und Variante vergleichbar, die örtliche Verteilung differiert jedoch stark.

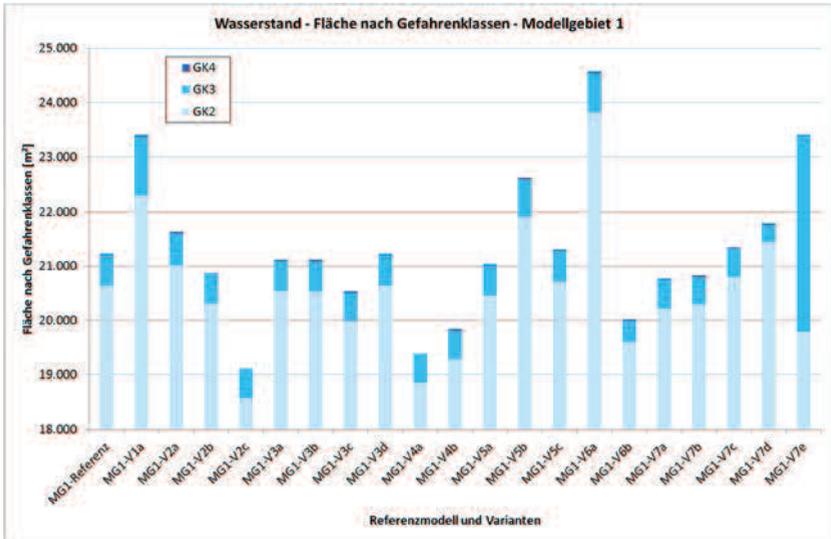


Abbildung 5-33: Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefahr (Wasserstand) alle Varianten - Modellgebiet 1

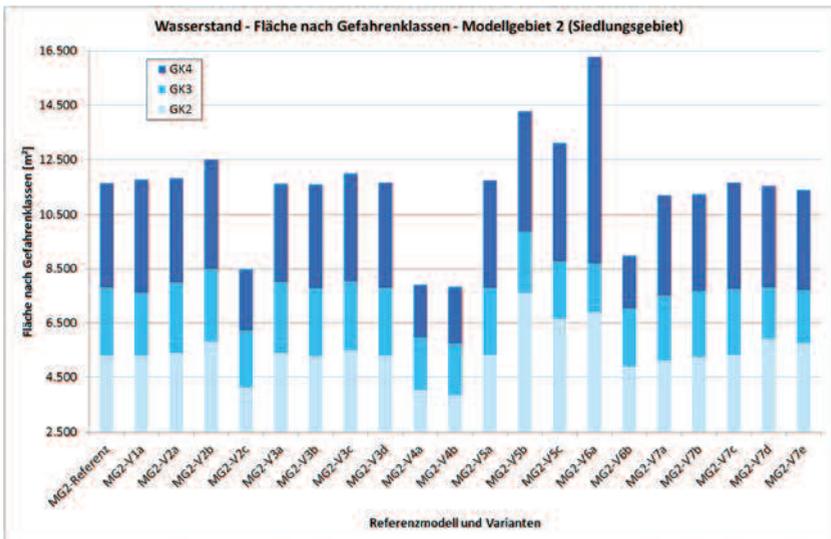


Abbildung 5-34: Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefahr (Wasserstand) alle Varianten - Modellgebiet 2

### **Fließgeschwindigkeitsbedingte Gefahr**

Abbildung 5-35 und Abbildung 5-36 zeigen die Werte des Indikators zur fließgeschwindigkeitsbedingten Überflutungsgefahr in beiden Gebieten aus den Berechnungen mit dem Referenzmodell und mit den Modellvarianten.

Bezogen auf diesen Indikator ist die Sensitivität zwischen den beiden Gebieten in etwa vergleichbar. Absolut gesehen ist die Sensitivität in Modellgebiet 2 insbesondere bzgl. der Fläche mit hohen Fließgeschwindigkeiten (GK3 und GK4) etwas höher als in Modellgebiet 1.

Hohe Auswirkungen auf den Indikator haben in beiden Modellgebieten Veränderungen der Oberflächenrauheit (V5bc), der Abflussbildung (V6ab) sowie die Absenkung des Modellgebietes im Straßenbereich (V7e).

Relevante Auswirkungen, jedoch gebietspezifisch in unterschiedlicher Ausprägung, haben die Varianten mit veränderter Abflusskonzentration (V2c und V4ab). Während sich durch die Modellierung des Hofflächenabflusses über das 1D-Kanalnetzmodell (V2c) im flachen Modellgebiet 1 hinsichtlich der Fließgeschwindigkeit wenig ändert, kommt es im steilen Modellgebiet 2 zu einer deutlichen Abnahme des Indikatorwerts. Durch die rein hydrologische Abflusskonzentration in den Varianten 4a und 4b entstehen im rückstaugeprägten Modellgebiet 1 erhöhte Fließgeschwindigkeiten, während in Modellgebiet 2 die Fläche mit hohen Fließgeschwindigkeiten (GK3 und GK4) deutlich zurückgeht.

Der Einfluss der zunehmenden Profilierung der Bordsteinkanten von Variante 7a bis 7d tritt im steileren Modellgebiet 2 durch eine entsprechende Zunahme des Indikators deutlich hervor. Im flachen Modellgebiet 1 ist dieser Zusammenhang nicht zu erkennen.

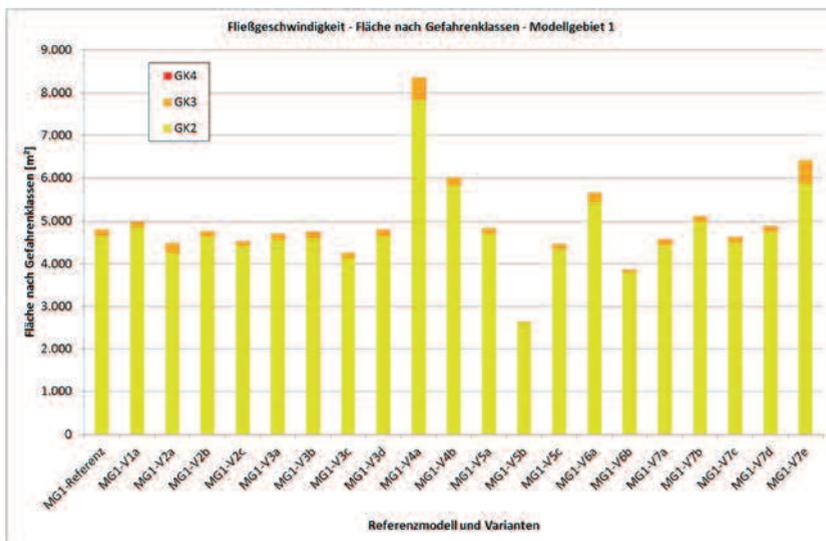


Abbildung 5-35: Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefahr (Fließgeschwindigkeit) alle Varianten - Modellgebiet 1

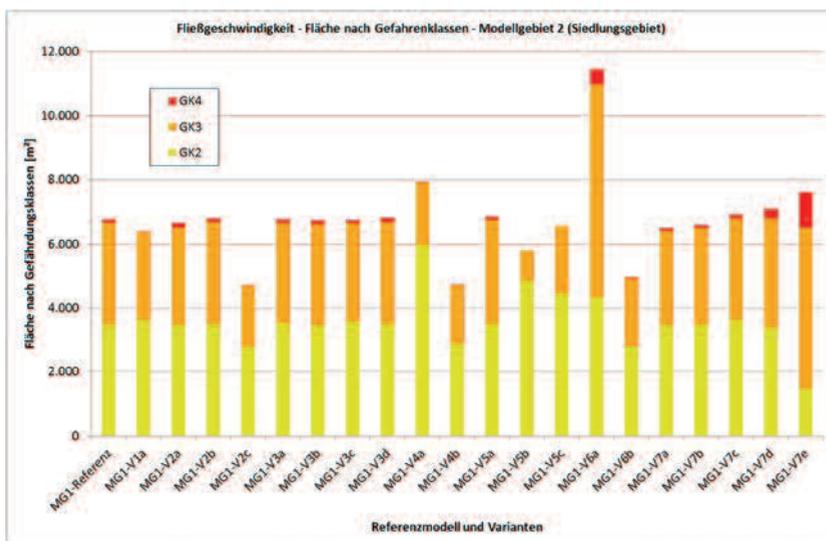


Abbildung 5-36: Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefahr (Fließgeschwindigkeit) alle Varianten - Modellgebiet 2

### Wasserstandbedingte Gefährdung

In Abbildung 5-37 und Abbildung 5-38 sind die Werte des Vergleichsindicators „wasserstandbedingte Überflutungsgefährdung“ für beide Modellgebiete für Referenzmodell und Varianten dargestellt.

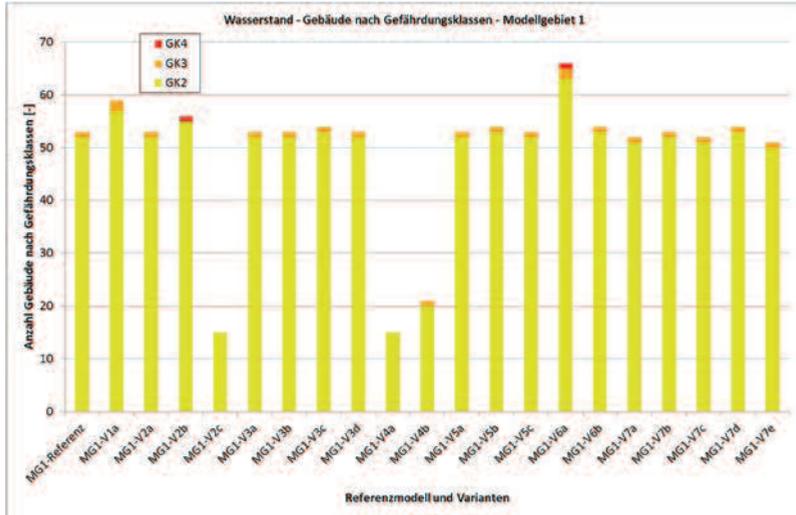


Abbildung 5-37: Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefährdung (Wasserstand) als Anzahl Gebäude je Gefährdungsklasse - alle Varianten - Modellgebiet 1

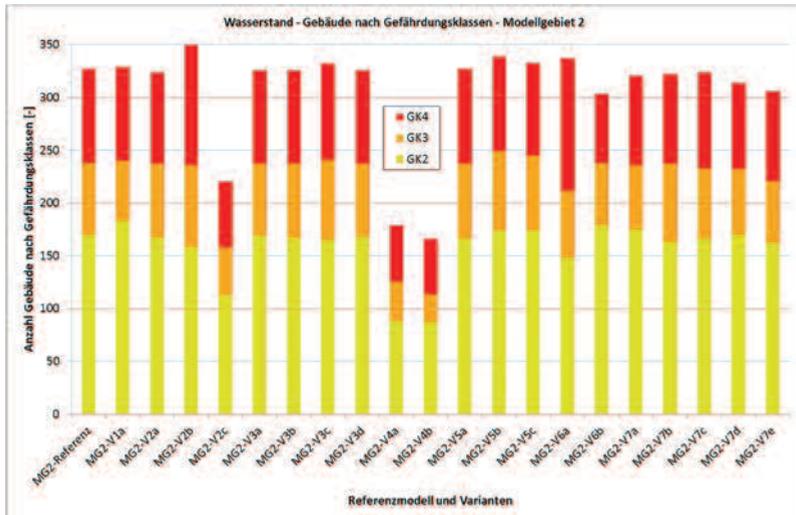


Abbildung 5-38: Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefährdung (Wasserstand) als Anzahl der Gebäude je Gefährdungsklasse - alle Varianten - Modellgebiet 2

Die Analyse bezogen auf die Anzahl der Gebäude je Gefährdungsklasse lässt keine Rückschlüsse auf eventuelle räumliche Verlagerungen der Überflutungsgefährdung zu. Um in der vergleichenden Betrachtung nicht alle zugehörigen Gefährdungskarten sichten zu müssen und um dieses Phänomen quantifizierbar zu machen, ist es notwendig, die Betrachtung der wasserstandbedingten Gefährdung um die Darstellung der Anzahl an Änderungen der gebäudebezogenen Gefährdungsklassen in den Varianten zu ergänzen (Abbildung 5-39 und Abbildung 5-40). Diese zeigt die Summe der Zunahmen von gebäudebezogenen Gefährdungsklassen (rotmarkiert/positiv), die Summe der Abnahmen (grünmarkiert/negativ) und deren Bilanz (graumarkiert). Diese Auswertung erlaubt es auch räumliche Verlagerungen, die bei gleichbleibender Anzahl an Gebäuden je Gefährdungsklasse auftreten, quantifiziert darstellen zu können.

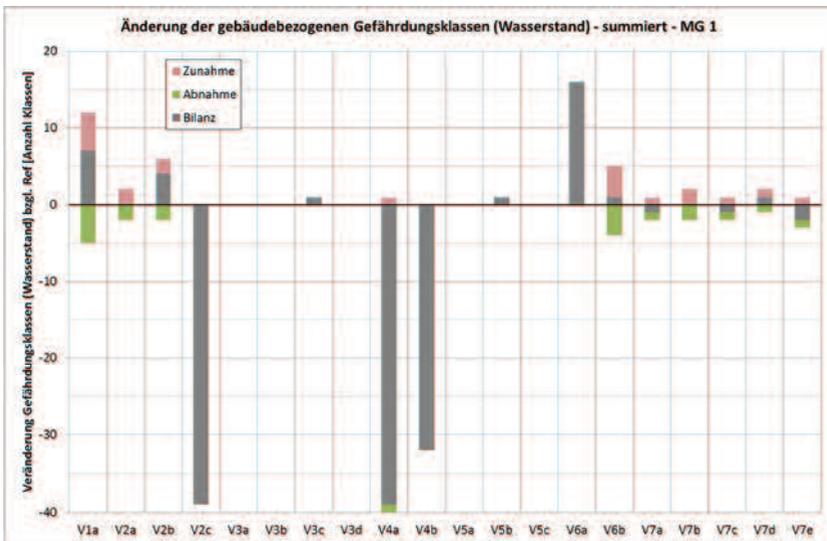


Abbildung 5-39: Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefährdung (Wasserstand) als summierte Klassenänderungen an allen Gebäuden - alle Varianten - Modellgebiet 1

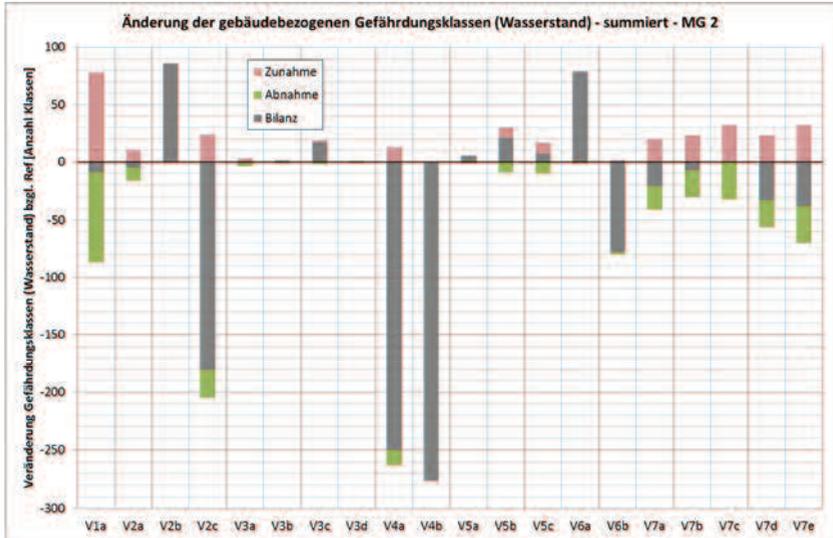


Abbildung 5-40: Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefährdung (Wasserstand) als summierte Klassenänderungen an allen Gebäuden - alle Varianten - Modellgebiet 2

In Abbildung 5-41 ist für beide Modellgebiete die mittlere Anzahl an Klassenänderungen je Gebäude, unabhängig von der Art der Änderung (Zu- oder Abnahme), in Bezug auf die gebietsspezifische Gesamtanzahl an Gebäuden dargestellt. Anhand dieser auf die Gesamtanzahl der Gebäude normierten Betrachtung gelingt der Vergleich der Sensitivität zwischen den Modellgebieten zuverlässiger.

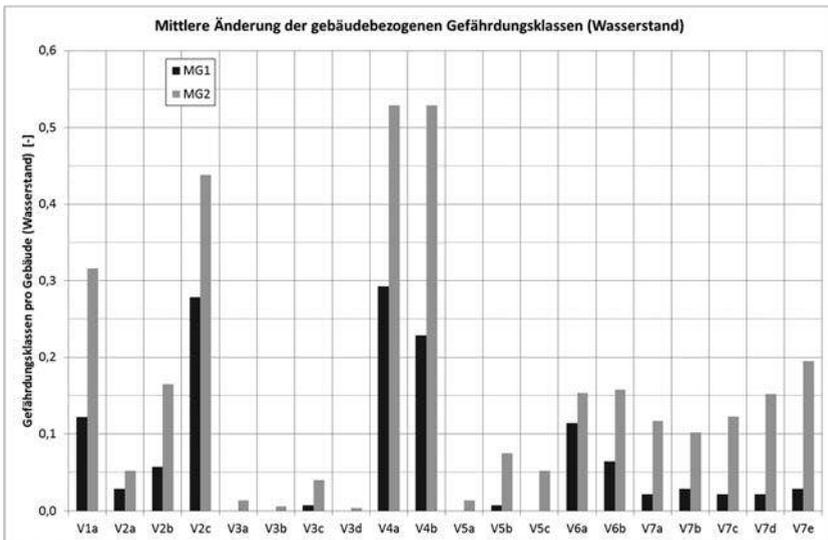


Abbildung 5-41: Sensitivitätsvergleich Überflutungsgefährdung (Wasserstand) als summierte Klassenänderungen an allen Gebäuden - alle Varianten - Modellgebiet 2

Die größten Auswirkungen auf die gebäudebezogene Gefährdung haben in beiden Gebieten die Varianten mit veränderten Ansätzen zur Abflusskonzentration (V2c und V4ab).

Bei der Betrachtung des Einflusses der veränderten Auflösung des Oberflächenmodells (Variante 1) und der veränderten Abbildung von Kopplungspunkten (Varianten 2a, 2b und 2c) ist die Notwendigkeit der Erfassung der räumlichen Verlagerung der Gefährdung über die Anzahl an Änderungen der gebäudebezogenen Gefährdungsklassen (Abbildung 5-39 und Abbildung 5-40) besonders auffällig.

Hier werden die deutlichen Auswirkungen, die die gröbere Auflösung des Oberflächenmodells insbesondere in Modellgebiet 2 auf die Gefährdungsaussage hat, deutlich. Auch die Varianten 2a und 2b führen zu leichten Veränderungen der Gefährdungsaussage infolge räumlicher Verlagerung.

Die Änderung des hydraulischen Ansatzes am Kopplungspunkt (Variante 3) zeigt nur geringe Auswirkungen. Die größte Auswirkung tritt innerhalb dieser Variantenbetrachtung bei der Begrenzung der Aufnahmekapazität in Variante 3c auf.

Die Veränderung der Oberflächenrauheit (Variante 5) hat im flachen Modellgebiet 1 nur geringe Auswirkungen. In Modellgebiet 2 sind leichte Auswirkungen auf die Gefährdung zu erkennen, die sich zum Teil durch die räumliche Verlagerung von Gefährdungslagen begründet.

Die Veränderung der Verlustansätze bei der Abflussbildung in Variante 6 zeigt deutliche Auswirkungen in beiden Gebieten.

Die Modellierung der Bordsteinkante (Varianten 7a bis 7d) und die Tieferlegung der Straßen in Variante 7e zeigen neben der Oberflächenrauheit und der größeren Auflösung ebenfalls eine hohe relative Diskrepanz der Auswirkungen im Vergleich zwischen den beiden Gebieten. In Modellgebiet 2 sind die Auswirkungen auf die Gefährdung deutlich erkennbar, in Modellgebiet 1 sind sie eher gering.

### Austausch an den Kopplungspunkten

In Abbildung 5-42 und Abbildung 5-43 sind die Werte zum Austauschvolumen an den Kopplungspunkten für beide Modellgebiete in den betrachteten Varianten dargestellt.

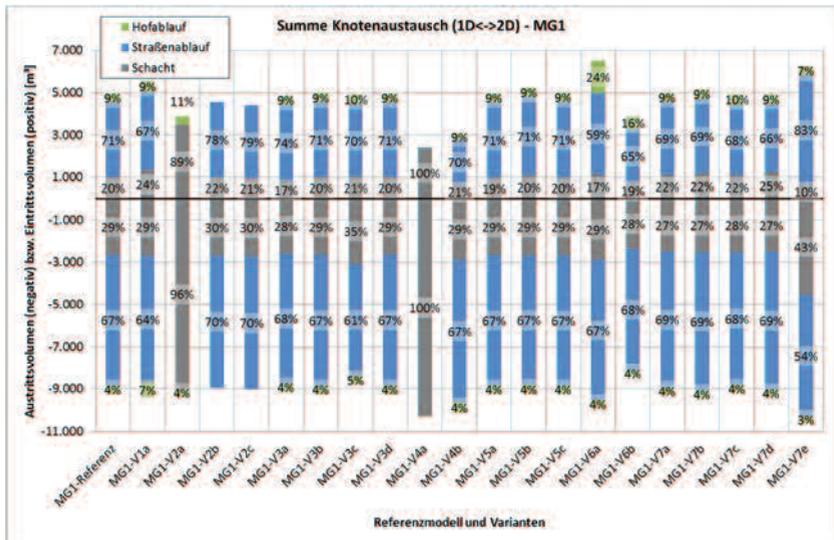


Abbildung 5-42: Sensitivitätsvergleich Austauschvolumen Kopplungspunkte alle Varianten - Modellgebiet 1

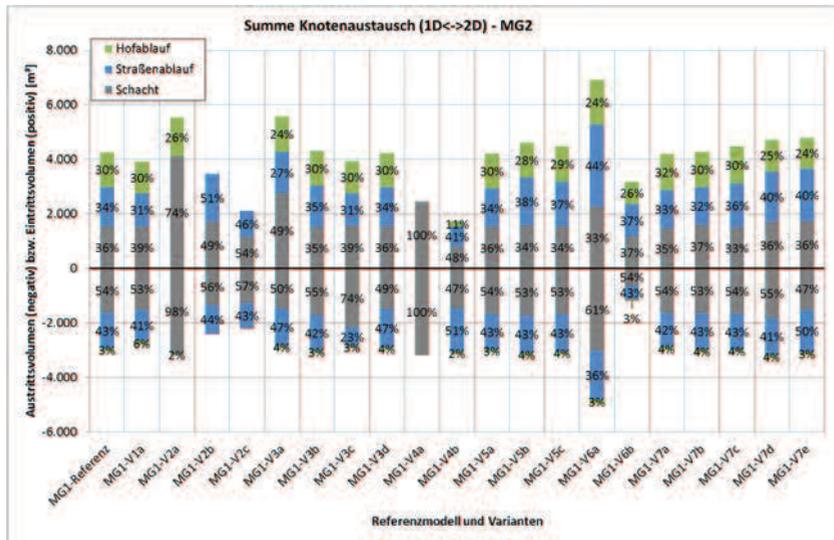


Abbildung 5-43: Sensitivitätsvergleich Austauschvolumen Kopplungspunkte alle Varianten - Modellgebiet 2

Allgemein ist bezüglich des Austauschverhaltens eine höhere Sensitivität in Modellgebiet 2 als in Modellgebiet 1 zu erkennen.

Hohe Auswirkungen auf die Summe des Austauschvolumens haben in beiden Gebieten die Varianten mit Veränderung der Abflusskonzentration (V4ab) sowie der Abflussbildung (V6ab). In beiden Gebieten ist durch die Kopplung ohne Straßenabläufe unter Ansatz offener Schächte (Variante 2a) ebenfalls ein hoher Effekt zu erkennen, der sich aber gegensätzlich auf das Austauschvolumen auswirkt. Im flachen Modellgebiet 1 kommt es darüber hinaus auch durch die Absenkung des Oberflächenmodells im Straßenbereich (Variante 7e) zu einer deutlichen Zunahme des Austauschvolumens. Im steilen Modellgebiet 2 ist die Veränderung nur gering. In Modellgebiet 2 sind deutliche Auswirkungen auf das Austauschverhalten in den Varianten 2b, 2c und 3a zu erkennen, die sich in Modellgebiet 1 nicht in diesem Maße zeigen. Die Art der Modellierung des Kopplungspunkts hat also bei stark ausgeprägter Topografie einen höheren Einfluss als es bei flacher Topografie der Fall ist. Die zunehmende Profilierung der Bordsteinkanten zeigt in Modellgebiet 2 einen Anstieg des Kanaleintritts über die Straßenabläufe, der in Modellgebiet 1 nicht gegeben ist.

#### 5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der folgenden Tabelle 5-19 sind die bereits detailliert beschriebenen Auswirkungen der Varianten zur Ableitung von Anwendungsempfehlungen übersichtlich zusammengefasst.

Tabelle 5-19: Darstellung der Auswirkungen der Varianten auf ausgewählte Indikatoren in den beiden Modellgebieten

	Überflutungsgefahr Wasserstand		Überflutungsgefährdung Wasserstand		Überflutungsgefahr Fließgeschwindigkeit		Austauschvolumen Bilanz		Austauschvolumen nach Kopplungspunkten differenziert		Summe der Auswirkungspunkte je Untervariante		
	MG1	MG2	MG1	MG2	MG1	MG2	MG1	MG2	MG1	MG2	MG1	MG2	Gesamt
V1 grobe Aufbösung	•••		••	•••					•		7	5	12
V2 Abbildung	•		•	•					••		6	6	12
V2b Kopplungspunkt	•	•	•	•					••	••	5	8	13
V2c	•••	•••	•••	•••			•••		••	••	9	15	24
V3a										••	0	4	4
V3b											0	0	0
V3c	•		•						•		2	4	6
V3d											0	0	0
V4	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	15	14	29
V4a	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	10	14	24
V4b	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	0	0	0
V5a											0	0	0
V5b	••	•••		•	•••	•••	•••			••	5	10	15
V5c	••	••		•	••	••	••			••	1	7	8
V6	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	12	14	26
V6a	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	9	11	20
V6b	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	1	4	5
V7a	•	•		••			•				1	4	5
V7b	•	•		•			•				1	4	5
V7c				•			•				0	3	3
V7d	•	•	•	••	•	•	•	•	•	•	2	6	8
V7e	•••	•	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	10	9	19

mit

	geringfügige Auswirkung	•	Abnahme ggü. Referenz
o	leichte Auswirkung	•	Zunahme ggü. Referenz
oo	moderate Auswirkung	•	räuml. Verlagerung der Gefährdung
ooo	starke Auswirkung	•	allgemeine Auswirkung

Die Matrix ermöglicht es, das Ausmaß der Sensitivität der Ergebnisse in Bezug auf die betrachteten Einflussgrößen je Indikator und Modellgebiet qualitativ zusammenzufassen. Dies wird über Anzahl und Farbgebung der Punkte in den Zellen geleistet:

Die Anzahl der Punkte gibt Auskunft über den Auswirkungsgrad (siehe Erläuterung). Die Einfärbung der Punkte erlaubt Rückschlüsse auf die Art der Auswirkung (siehe Erläuterung).

In den letzten drei Spalten sind die Auswirkungspunkte, unabhängig von der Art der Auswirkung je Modellvariante bzw. Einflussgröße, zu einem Wert für die Gesamtauswirkung summiert. Hierbei wird in der drittletzten Spalte und in der vorletzten Spalte nach dem jeweiligen Modellgebiet differenziert. In der letzten Spalte ist die Summe aus beiden Gebieten gebildet. Innerhalb der drei Spalten sind zur visuellen Einordnung der jeweiligen Gesamtauswirkung die Maxima rotmarkiert, die Minima weißmarkiert. Entsprechend sind die Zwischenwerte abgestuft eingefärbt.

Die Matrix führt die grundlegenden Erkenntnisse der Sensitivitätsanalyse zusammen und ermöglicht die folgenden Betrachtungen:

- Abschätzung der Auswirkung der Einflussgrößen, repräsentiert durch die Modellvarianten, auf die verschiedenen Indikatoren
- Vergleich der **indikatorspezifischen Auswirkungen**
- Einordnung der Auswirkung der Modellvarianten im Vergleich zu den Auswirkungen der übrigen Modellvarianten, als **variantenspezifische Auswirkung**
- gebietsspezifische Abschätzung des Ausmaßes und der Art der Auswirkung durch Vergleich zwischen den beiden Modellgebieten, als **gebietsspezifische Auswirkung**

Die Matrix lässt keine Rückschlüsse auf die Ursachen für die Auswirkungen durch die Einflussgrößen, die durch die Modellvarianten repräsentiert werden, zu. An dieser Stelle wird auf die vorstehenden Kapitel verwiesen.

Zur weitergehenden Verallgemeinerung der Erkenntnisse ist die Gesamtauswirkung der Modellvariantengruppen, die die Einflussgrößen repräsentieren, als gemittelte Summen der Auswirkungspunkte bilanziert und in Abbildung 5-44 als gestapelte Säulen je Modellgebiet dargestellt.

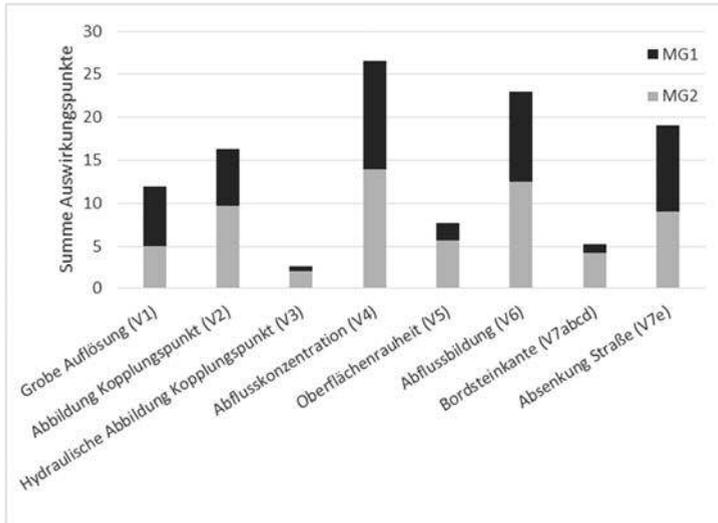


Abbildung 5-44: Auswirkungspunkte je Modellvariantengruppe und Modellgebiet als gestapelte Säulen

Die Abbildung lässt die folgenden Erkenntnisse zum Ausmaß der Sensitivität der Ergebnisse in Bezug auf die betrachteten Einflussgrößen je Indikator und Modellgebiet zu:

Die gröbere Auflösung des Oberflächenmodells (V1) hat, mit der hier gewählten Auslenkung, die fünftgrößte Gesamtauswirkung im Vergleich zwischen den acht Modellvariantengruppen. Die Auswirkung ist im flachen Modellgebiet 1 etwas höher als im steilen Modellgebiet 2, da hier zusätzlich zur starken Verlagerung der Überflutungsgefährdung auch eine deutliche Zunahme der wasserstandbedingten Überflutungsgefahr zu beobachten ist.

Die Abbildung des Kopplungspunkts (V2) hat die viertgrößte Gesamtauswirkung im Vergleich zwischen den acht Modellvariantengruppen. Es bestehen moderate Auswirkungen in beiden Gebieten hinsichtlich der wasserstandbedingten Überflutungsgefahr und der Überflutungsgefährdung. Starke Auswirkungen ergeben sich bezüglich des Austauschverhaltens an den Kopplungspunkten. Dies ist insbesondere im steileren Modellgebiet 2 der Fall.

Die hydraulische Modellierung des Kopplungspunktes (V3) hat eine sehr geringe Auswirkung. Es zeigen sich lediglich leichte Auswirkungen für den Ansatz mit einer Maximalbegrenzung des Austauschs an den Straßenabläufen (V3c). Die Gesamtauswirkung ist im steilen Modellgebiet 2 höher als im flachen Modellgebiet 1.

Die Veränderung der Abflusskonzentration hin zu einer reinen Abflussbildung im 1D-Kanalnetzmodell mit direkter Zuordnung zu den Schächten (V4) weist in beiden Modellgebieten für alle Indikatoren starke Auswirkungen auf und hat die

größte Gesamtauswirkung der betrachteten Modellvarianten. Sie führt zu einer deutlichen Unterschätzung der wasserstandbezogenen Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung.

Die Veränderung der Oberflächenrauheit (V5) hat moderate bis starke Auswirkungen auf die wasserstandbedingte und die fließgeschwindigkeitsbedingte Überflutungsgefahr. Die Auswirkungen sind im steilen Modellgebiet 2 höher. Auf die wasserstandbedingte Gefährdung und den Austausch an den Kopplungspunkten sind die Auswirkungen eher gering. Hier kommt es lediglich in Modellgebiet 2 zu leichten Auswirkungen. Die Gesamtauswirkung liegt im Vergleich zu den übrigen acht Modellvariantengruppen an viertkleinster Stelle.

Die Änderung der Verlustansätze zur Abflussbildung (V6) hat die zweitgrößte Gesamtauswirkung im Vergleich zwischen den acht Modellvariantengruppen. Dies ist nicht nur für den extremen Ansatz ohne Verluste (V6a), der eine Zunahme der Indikatoren bewirkt, der Fall. Auch für die Flächenmittelung der Abflussverluste (V6b), die eine Abnahme der Indikatoren bewirkt, ergeben sich starke Auswirkungen.

Die unterschiedlichen Ansätze zur Modellierung der Bordsteinkanten (V7abcd) haben fast ausschließlich Auswirkungen im steilen Modellgebiet 2. Die Auswirkungen sind leicht bis moderat. Die Gesamtauswirkung liegt an drittkleinsten Stelle im Vergleich zwischen den Modellvariantengruppen. Für die wasserstandbedingte Überflutungsgefährdung ergeben sich räumliche Verlagerungen der Überflutungsgefährdung im steilen Modellgebiet 2.

Die Absenkung des Oberflächenmodells im Bereich der Straßen (V7e) führt zu starken Auswirkungen auf Austauschvolumen und wasserstandbedingte Gefahr im flachen Modellgebiet 1. In Modellgebiet 2 ergeben sich starke Auswirkungen auf Fließgeschwindigkeit und wasserstandbedingte Gefährdung. Insgesamt ist die Auswirkung die dritthöchste im Vergleich zu den übrigen Modellvariantengruppen. Sie zeichnet sich durch sehr gebietsspezifische Auswirkungen aus.

Die herausgestellten, jeweiligen großen oder kleinen Auswirkungen sind gleichrangig mit der Bedeutung der mit den Modellvarianten untersuchten Einflussgrößen. Entsprechend hat deren Modellierung mit höchster oder geringerer Detaillierung zu erfolgen. Auch die Notwendigkeit einer zukünftigen Verbesserung der jeweiligen Modellansätze leitet sich daraus ab (siehe hierzu die weiteren Ausführungen in den Kapiteln 6 und 7).

**Sonstige, allgemeine Erkenntnisse**

Nachfolgend sind sonstige, allgemeine Erkenntnisse aus den Kapiteln 5.2 und 5.3 zusammengefasst, die zusammen mit den vorstehenden, sensitivitätsbezogenen Erkenntnissen bei der Ableitung von Anwendungsempfehlungen (Kapitel 6) berücksichtigt sind.

Die Voruntersuchungen zur Auswahl eines Ansatzes zur Niederschlagsbelastung zeigen eine deutliche Relevanz der Art der zeitlichen Verteilung der Niederschlagsbelastung. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde die Euler-Verteilung Typ II als maßgebend identifiziert.

Wie die Betrachtung der beiden Modellgebiete zeigt, kann die maßgebende Dauerstufe beträchtlich differieren.

Die Betrachtung der beiden Modellgebiete zeigt deutliche Unterschiede hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Verteilung der Schwerpunkte zu Kanaleintritt und Kanalaustritt.

Bei Wahl einer groben Auflösung des Oberflächenmodells kann es zu einer starken Glättung desselben kommen. Dies führt insbesondere bei kleinräumigen Vertiefungen im Gebäudenahbereich (Lichtschächte, Kellertreppen etc.) möglicherweise zu einer Unterschätzung der Gebäudegefährdung.

Der Kompensationsansatz fehlender Straßenabläufe durch geöffnete Schächte ist zu hinterfragen, da er zu abweichenden Ergebnissen in beiden Modellgebieten führt und eine örtliche Verlagerung des Kanaleintritts und Kanalaustritts nicht verhindern kann.

Die Modellierung von Hofabläufen hat in beiden Gebieten aus unterschiedlichen Gründen einen hohen Einfluss. Im flachen Modellgebiet 1 mit Blockrandbebauung stellt sie häufig die einzige Verbindung zwischen Hofflächen und Straße/Kanalnetz dar. Dies kann sowohl eine Belastung (Rückstau) sowie eine Entlastung (Entwässerung) der Hofflächen zur Folge haben. Im steilen Modellgebiet 2 werden durch Hofabläufe hohe Wasserstände an der Hangseite der Gebäude verhindert und ein großer Anteil des Hangabflusses gefasst.

Der konventionelle hydraulische Kopplungsansatz über die Wehrüberfallformel zum Kanaleintritt ergibt für die hier eher kleinräumigen Betrachtungen geringe Auswirkungen. Bei hohen Wasserständen und einer gleichzeitig geringen Auslastung des Kanals entsteht jedoch ein vergleichsweise hoher Kanaleintritt. Dieser könnte sich dann weiter unterhalb deutlich auf die Gefährdungsaussage auswirken.

Eine neigungsabhängige Modellierung des hydraulischen Zusammenhangs an den Straßenabläufen zeigt keine relevanten Auswirkungen.

Die Begrenzung der maximalen Kapazität der Straßenabläufe hat unter den hier untersuchten Varianten zur hydraulischen Abbildung des Kopplungspunktes die

größte Auswirkung. Im stark rückstaubelasteten Modellgebiet 1 bewirkt die Begrenzung eine Verringerung des Kanalaustritts und trägt damit auch zu einer Verringerung der ermittelten Überflutungsgefahr bei. In Modellgebiet 2 verringert sie den Kanaleintritt und führt dadurch zu einer höheren berechneten Wassermenge auf der Oberfläche.

Das Herausheben der Schachtdeckel ist aufgrund geringerer Druckunterschiede in flachen Gebieten weniger relevant als in steilen Gebieten.

Durch eine teilflächenscharfe bzw. eine flächengemittelte Abbildung der Oberflächenrauheit können Abflusswege minimal beeinflusst werden. Dies kann unter Umständen zu einer relevanten Änderung des simulierten Abflussgeschehens führen (Beispiel: Böschung an der Landstraße).

Die Art der Modellierung der Bordsteinkante hat besonders im steileren Modellgebiet 2 Auswirkungen auf den Oberflächenabfluss.

Die ausschließliche Betrachtung der Gefährdungsindikatoren, insbesondere als Summenindikator, unterschlägt unter Umständen Effekte der räumlichen Verlagerung von Gefährdungslagen. Mithilfe der Bilanzierung der gebäudespezifischen Änderung der Gefährdungsklassen (siehe Kapitel 5.3) wurde neben dem Vergleich der Gefährdungskarten eine Möglichkeit zur Quantifizierung dieses Effekts gefunden.

## 6 Abgeleitete Anwendungsempfehlungen

Im Folgenden werden auf Basis der durchgeführten Literaturrecherche und der Erkenntnisse der Sensitivitätsanalyse allgemeine und gebietspezifische Empfehlungen zur Konfiguration eines gekoppelten 1D/2D-Abflussmodells für die Analyse der Überflutungsgefährdung bei Starkregen ausgesprochen.

### ***Niederschlagsbelastung***

Auf Grundlage der durchgeführten Voruntersuchung ist, falls keine sonstigen anwendungsspezifischen Informationen vorliegen, eine zeitliche Verteilung der Niederschlagsbelastung nach Euler Typ II zu empfehlen. Dies weicht von der Empfehlung in DWA-M 119 zur Verwendung von Niederschlagsbelastungen mit weniger ausgeprägter zeitlicher Intensitätsverteilung ab.

Eine Voruntersuchung zur Identifizierung der maßgebenden Dauerstufe ist bei Anwendung von gekoppelten 1D/2D-Abflussmodellen unbedingt empfehlenswert.

### ***Auflösung des Oberflächenmodells***

Die maximale Flächengröße der Elemente des Oberflächenmodells sollte den Wert von 1 m<sup>2</sup> nicht überschreiten. Die vorliegende Untersuchung bestätigt damit die Vermutung, die sich bereits aus den Untersuchungen von Hsu et al. (2016) ergab. Bei Vorliegen einer höheraufgelösten Datengrundlage ist ein Vergleich mit höherer Auflösung des Oberflächenmodells im Rahmen einer Voruntersuchung anzuraten. Insbesondere bei Bilanzierung der gebäudebezogenen Überflutungsgefährdung sind die Ergebnisse eines Modells mit deutlich abweichender, geringerer Auflösung nicht vergleichbar.

### ***Abbildung des Kopplungspunkts***

Die Kompensation der Wirkung von Straßenabläufen bezüglich des Wasseraustauschs mit der unterirdischen Kanalisation (Wassereintritt und Wasseraustritt) durch geöffnete Schächte führt zu einer räumlichen Verlagerung der Überflutungsgefährdung. In steileren Gebieten kommt eine Verringerung des Kanaleintritts aufgrund der fehlenden Straßenabläufe hinzu, da an der Bordsteinkante fließendes Wasser von den Schächten nicht erfasst wird. Des Weiteren hat die Abbildung von Straßenabläufen Auswirkungen auf die Abbildung des Kanalaustritts.

Aus diesen Gründen wird eine Abbildung von Straßenabläufen in Überflutungsberechnungen nachdrücklich empfohlen. Bei Vernachlässigung von Straßenabläufen im Modell könnten die Simulationsergebnisse insbesondere in steilen Gebieten nicht vergleichbar sein.

Einen beachtenswerten Einfluss auf die Gefährdungsaussage haben auch die Hofabläufe. Bei Vorliegen von Informationen zu Lage und Art sollten diese unbedingt entsprechend modelliert werden. Ist dies nicht der Fall, ist der Einsatz des im Referenzmodell angewandten Vorgehens zu befürworten. Eine Kompensation durch eine hydrologische Abflusskonzentration des Hofflächenabflusses ist nicht zu empfehlen. Die Auswirkungen dieses Ansatzes auf die Simulationsergebnisse und Gefährdungsaussage sind in beiden untersuchten Gebietstypen hoch. Generell besteht weiterhin Forschungsbedarf zum Thema der Modellierung von Hofabläufen. Für eine abschließende Empfehlung bleiben Untersuchungen mit gesicherter Datengrundlage abzuwarten. Entsprechende Daten zu Existenz und Lage von Hofabläufen könnten künftig mithilfe drohnengestützter Luftbilderfassung generiert werden (Moy de Vitry et al. 2014).

#### ***Hydraulische Abbildung des Kopplungspunkts***

Die untersuchten Ansätze zur hydraulischen Abbildung des Kopplungspunkts zeigen nur geringfügige Auswirkungen. Aufgrund der geringen Relevanz kann der Aufwand zu dessen Modellierung gering gehalten werden. Dennoch ist die Wahl eines möglichst realitätsnahen Ansatzes anzuregen. Empfohlen wird eine Modellierung über Wasserstand-Abflussbeziehungen auf Basis entsprechender Versuchsergebnisse (wie z.B. in Kemper et al. 2016).

Einen durchaus relevanten Einfluss zeigt die Begrenzung der maximalen Austauschkapazität am Straßenablauf trotz der hier eher konservativ (hoch) gewählten Maximalbegrenzung (20 l/s). Bei einer geringeren Maximalgrenze sind deutlich größere Auswirkungen zu erwarten. Ist die maximale Austauschkapazität bekannt, sollten die entsprechenden Obergrenzen definiert werden. Falls sich aus künftigen Forschungsergebnissen zum Austausch an Straßenabläufen allgemeingültige Empfehlungen zur maximalen Austauschkapazität ergeben, sollten diese im Rahmen der Modellerstellung zur bi-direktional gekoppelte 1D/2D-Abflussberechnung entsprechend berücksichtigt werden.

In steilen Gebieten sollte ein Herausheben der Schachtdeckel modelliert werden.

#### ***Abflusskonzentration***

Der Ansatz einer reinen Abflussbildung im 1D-Kanalnetzmodell mit direkter Zuordnung zu den Schächten weist in dieser Untersuchung enorme Abweichungen hinsichtlich der Simulationsergebnisse auf. Eine Vergleichbarkeit der Gefährdungsaussage mit jeweils unterschiedlichen Ansätzen ist nicht gegeben. Der An-

satz führt zu einer deutlichen Unterschätzung der wasserstandbezogenen Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung. Er kann als Relikt aus der Entwicklungsphase von der konventionellen 1D-Kanalnetzmodellierung hin zur gekoppelten 1D/2D-Abflussmodellierung angesehen werden.

Bei Anwendung eines gekoppelten 1D/2D-Abflussmodells ist dringend ein differenzierter Ansatz zur Abflusskonzentration mit hydrologischer Abbildung des Dachflächenabflusses und direkter Berechnung des Oberflächenmodells außerhalb der Dachflächen zu empfehlen. Diese Empfehlung gilt gebietsunabhängig. Entsprechende Untersuchungsergebnisse in Fuchs & Schmidt (2015b) und DBU (2017b) unterstützen diese Empfehlung.

### ***Oberflächenrauheit***

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde bei der Auslenkung dieser Einflussgröße eine deutliche Sensitivitätsspanne identifiziert. Infolgedessen ist eine gewissenhafte Wahl des Ansatzes zur Oberflächenrauheit geboten. Ein ebenfalls relevanter Unterschied in den Simulationsergebnissen ist durch die teilflächenspezifische Abbildung der Oberflächenrauheit zu erkennen. Diese wirkt sich insbesondere im steileren Untersuchungsgebiet aus.

Es wird eine sorgfältige Wahl der Oberflächenrauheit empfohlen. Insbesondere in steilen Gebieten sollte ein teilflächenspezifischer Ansatz gewählt werden.

### ***Abflussbildung***

Die hohe identifizierte Sensitivitätsspanne macht die hohe Relevanz einer gewissenhaften Wahl des Abflussbildungsansatzes deutlich. Als weitere Erkenntnis wird ein hoher Unterschied für alle Indikatoren und Modellgebiete zwischen teilflächenspezifischen und flächengemittelten Ansätzen sichtbar. Entsprechend ist ein teilflächenspezifischer Ansatz zur Abflussbildung insbesondere für große Gebiete mit Außengebietszuflüssen dringend zu empfehlen. Im innerstädtischen Bereich ist die flächenspezifische Ansatzbildung von vergleichsweise geringerer Relevanz, allerdings sollten auch hier, besonders bei Modellierung einer direkten Berechnung für größere Grünflächen und abgeschlossene Innenhofbereiche, spezifische Ansätze gewählt werden.

### ***Modellierung der Bordsteinkanten***

Der Einfluss der Modellierung der Bordsteinkante ist im flachen, rückstaubelasteten Modellgebiet 1 geringfügig. Im steilen Modellgebiet 2 sind deutliche Auswirkungen vorhanden.

Die Empfehlung zur Modellierung von Bordsteinkanten hängt von der Güte des vorhandenen Geländemodells sowie von den softwareseitig verfügbaren Modellierungswerkzeugen ab.

Von einer Modellierung über kleine Mauern wird abgeraten, da der realitätsferne Effekt der Abflussbehinderung von gehwegseitigen Abflüssen einen deutlichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse und Aussagen hat.

Bei einer sehr hohen Güte des Geländemodells und entsprechend hoher Auflösung des Oberflächenmodells werden unter Umständen keine Bruchkanten benötigt. Bei einer sehr geringen Modellgüte liefert auch die Definition von Bruchkanten keinen Beitrag zu einer stärkeren Profilierung der Bordsteinkanten.

Für die vorliegende Datengrundlage und die im verwendeten Programm verfügbaren Modellierungswerkzeuge wird der Ansatz einer Doppelbruchkante nahegelegt. Bei Verwendung anderweitiger Softwarelösungen sind die verfügbaren Modellierungswerkzeuge zu prüfen und für eine entsprechende Profilierung der Bordsteinkante insbesondere in steilen Gebieten zu sorgen.

### ***Modellansatz mit Absenkung der Straßen***

Die Modellierung von abgesenkten Straßen führt für beide Gebietstypen zu starken Abweichungen in den Simulationsergebnissen und der Gefahren- und Gefährdungsaussage. Bei einer geringen Güte der Höhendaten kann diese Maßnahme dazu beitragen ein klares Überflutungsbild zu liefern, in dem die Straßen als Hauptachsen des Abflustransports deutlich hervortreten. Ob dies realitätsnah und vertretbar ist, sollte dann sichergestellt werden. Die deutliche Einflussnahme auf die Simulationsergebnisse und Aussagen zeigt, dass bei der Implementierung Vorsicht geboten ist.

Bei Vorliegen einer ausreichenden Güte der Höhendaten sollte auf diese Modellanpassung unbedingt verzichtet werden. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse und der Aussagen ist mit diesem Modellansatz nicht gegeben.

### ***Abbildung von Mauern und Gebäudedurchlässen***

Es ist anzunehmen, dass eine fehlende Modellierung von Mauern und Gebäudedurchlässen große Auswirkungen auf die lokale Gefahren- und Gefährdungsaussage haben kann. Untersuchungen wie z.B. in DBU (2017b) zeigen entsprechende Zusammenhänge.

Die zwar noch aufwendige Identifizierung und Implementierung von Mauern und Gebäudedurchlässen ist daher dringend zu empfehlen. Mit weiterer Entwicklung der Datenerfassungsmöglichkeiten und Zunahme der Datenverfügbarkeit ist eine zukünftige Abnahme des hierfür notwendigen Aufwandes zu erwarten.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Ein zielgerichtetes Risikomanagement ist Hauptbestandteil der kommunalen Überflutungsvorsorge. Die Einschätzung von Überflutungsrisiken im urbanen Raum setzt Kenntnisse zur vorherrschenden Gefährdung und zum vorhandenen Schadenspotenzial voraus. Zur Lokalisierung und Bewertung von Bereichen mit erhöhter Überflutungsgefährdung existieren derzeit verschiedene methodische Ansätze. Diese reichen von der hydraulischen Analyse des Entwässerungssystems über die topografische Analyse der Oberfläche bis hin zur gekoppelten, hydrodynamischen Berechnung von Abflussvorgängen auf der Oberfläche und im Kanalnetz anhand entsprechender Abflussmodelle.

Bestehende Anwendungsempfehlungen und vergleichende Untersuchungen stellen die bi-direktional gekoppelte 1D/2D-Abflussberechnung als den methodisch umfassendsten und aussagekräftigsten Ansatz zur Durchführung von Analysen zur Überflutungsgefährdung dar (siehe Literaturrecherche in Kapitel 2.4.1). Dieser ermöglicht kleinräumige, objektspezifische Gefährdungsaussagen, welche aufgrund des deutlich objektspezifischeren Charakters der Bemessungskriterien für kanalinduzierte Überflutungen infolge der Neuauflage der DIN EN 752:2017-07 notwendig sind.

Nachteile der Methode sind große erforderliche Rechen- und Speicherkapazitäten sowie die Notwendigkeit einer verhältnismäßig großen Anzahl an Eingangsdaten. Unter der Annahme einer weiterhin ansteigenden Verfügbarkeit von Rechen- und Speicherkapazitäten und der weiteren Zunahme der Quantität und Qualität überflutungsrelevanter Infrastruktur- und Geodaten, kann von einer zukünftigen Abschwächung dieser Nachteile und daher von einer Zunahme der Relevanz der Methode ausgegangen werden.

Das Phänomen urbaner Starkregenüberflutungen ist aufgrund des Zusammenwirkens von Abflussprozessen auf der Oberfläche, im Entwässerungssystem und an den Schnittstellen hochkomplex. Entsprechend dieses Phänomens sind auch die gekoppelten Modelle komplex und unterscheiden sich deutlich hinsichtlich der Zahl der erforderlichen Eingangsdaten und Modellparameter gegenüber einer konventionellen, eindimensionalen, hydrodynamischen Kanalnetzberechnung. Diese hohe Zahl an Einflussgrößen lässt auf eine hohe Variabilität der Ergebnisse je nach gewählter Modellkonfiguration schließen. Untersuchungen zu den Auswirkungen einzelner Einflussgrößen zeigten entsprechende Sensitivitäten (siehe Literaturrecherche in Kapitel 2.4.2). Bei Einsatz dieses vergleichsweise komplexen methodischen Ansatzes werden, um eine Vergleichbarkeit von Analyseergebnissen und Gefährdungsaussagen zu gewährleisten, Vorgaben und Empfehlungen zu seiner

Anwendung und Konfiguration benötigt. Die Erarbeitung entsprechender gebiets-spezifischer Anwendungsempfehlungen war Zielsetzung der vorliegenden Arbeit.

Dazu wurde eine Untersuchungsmethodik entwickelt, mit deren Hilfe die Auswirkungen von Einflussgrößen durch Vergleich verschiedener Modellvarianten mit einem hochdetaillierten, bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Referenzmodell mithilfe entwickelter Vergleichsindikatoren im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht wurden. Die in den beiden Modellgebieten erstellten Referenzmodelle wurden mithilfe von Daten zu historischen Überflutungsereignissen bestmöglich plausibilisiert.

Im Rahmen der durchgeführten Sensitivitätsanalyse wurde eine große Zahl an Zusammenhängen und Auswirkungen durch Auslenkung relevanter Einflussgrößen identifiziert und in den vorausgegangenen Kapiteln detailliert beschrieben. So konnte der Kenntnisstand zu Auswirkungen von Einflussgrößen innerhalb der bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung durch die Erkenntnisse dieser Arbeit erweitert werden.

Anhand der ermittelten Auswirkungen der Einflussgrößen und der durchgeführten Literaturrecherche wurden die in Kapitel 6 dargelegten, Anwendungsempfehlungen zum Einsatz bi-direktional gekoppelter 1D/2D-Abflussberechnungen abgeleitet. Sie stellen das Hauptergebnis der vorliegenden Untersuchung dar.

Durch die Verwendung gefährdungsbezogener Vergleichsindikatoren zur Bewertung der Einflussgrößen weisen die erarbeiteten Anwendungsempfehlungen eine hohe Praxisrelevanz für künftige Analysen zur Überflutungsgefährdung bei Starkregen auf.

Die Durchführung der Untersuchung an zwei Modellgebieten, die sich hinsichtlich relevanter Gebieteigenschaften deutlich unterscheiden, erlaubte eine Erfassung gebietsspezifischer Abhängigkeiten. Aufgrund der großen Diversität realer Untersuchungsgebiete ist dennoch immer davon auszugehen, dass sich die verallgemeinerten gebietsspezifischen Abhängigkeiten nicht uneingeschränkt auf jedes Untersuchungsgebiet übertragen lassen.

Die entwickelte Untersuchungsmethodik kann bei künftigen Erweiterungen oder Konkretisierungen der Anwendungsempfehlungen, z.B. anhand weiterer Modellgebiete oder neuer Einflussgrößen, eingesetzt werden.

## **7.2 Fazit und Ausblick**

Die vorliegende Untersuchung zeigt diverse Zusammenhänge und Auswirkungen auf, die sich durch Auslenkung relevanter Einflussgrößen bei der bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung ergeben. Es wird deutlich, dass eine hohe Ergebnisvariabilität bereits bei Auslenkung einzelner Einflussgrößen möglich ist. Durch die Ergebnisse dieser Arbeit wird der Kenntnisstand zu Auswirkungen von

Einflussgrößen innerhalb der bi-direktional gekoppelten 1D/2D-Abflussberechnung erweitert. Mit der entwickelten gefährdungsbezogenen Untersuchungsmethode ist darüber hinaus eine praxisbezogene Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher Einflussgrößen möglich.

Aufgrund der gezeigten hohen Ergebnisvariabilität bei Auslenkung einzelner Einflussgrößen sind konkrete Vorgaben und Empfehlungen zur Modellkonfiguration notwendig um vergleichbare Ergebnisse und Gefährdungsaussagen bei der Durchführung von Analysen zur Überflutungsgefährdung zu gewährleisten.

Die herausgestellten großen oder weniger großen Auswirkungen sind gleichbedeutend mit der Bedeutung der mit den Modellvarianten untersuchten Einflussgrößen. Entsprechend hat deren Modellierung mit höchster oder geringerer Detaillierung zu erfolgen. Erste konkrete und allgemeine Empfehlungen konnten im Rahmen dieser Arbeit abgeleitet werden.

Ein umfassender Vorgabenkatalog, der eine Vergleichbarkeit der Ergebniswelt gewährleistet und so die Streuung möglicher Analyseergebnisse begrenzt, bleibt zu entwickeln.

Kurzfristig ist bei der Erstellung sowie bei der Bewertung von Gefährdungsanalysen, spätestens jedoch bei der auf den Analyseergebnissen basierenden Maßnahmenplanung und Maßnahmenumsetzung auf eine entsprechende Qualitätssicherung der verwendeten Modelle zu achten.

Für die Entwicklung weiterer Empfehlungen und Vorgaben sind aus Sicht des Autors die folgenden, weitergehenden Untersuchungen notwendig:

- Detailliertere Betrachtung derjenigen Einflussgrößen, für die die entsprechende Empfehlung im Rahmen der vorliegenden Untersuchung noch zu unkonkret bleibt (z.B. weiter abgestufte Auflösungen des Oberflächenmodells, stärkere Begrenzung der maximalen Austauschkapazität am Straßenablauf: z.B. 10 l/s (Begrenzung englische Straßenabläufe nach (Martin 2011))
- Untersuchung des Einflusses weiterer Modellvarianten und Ableitung entsprechender Empfehlungen (bspw. zur Überlastung der Dachentwässerung, zu dem Fall, dass Schachtdeckel nach dem Herausheben offen bleiben wie z.B. in tandler.com GmbH (2016), zu dem Fall, dass Keller geflutet werden und die entsprechende Wassermenge dem Oberflächenmodell entzogen wird etc.)
- Untersuchung des Einflusses einer Effektüberlagerung bei gleichzeitiger Auslenkung mehrerer Einflussgrößen (= globale Sensitivitätsanalyse)
- Untersuchungen an weiteren repräsentativen Gebietstypen zur Erweiterung der gebietsspezifischen Aussagekraft der Empfehlungen

- Untersuchungen an stärker abgesicherten Referenzmodellen (z.B. Modell mit Daten zu Hofabläufen, vielfältigere bzw. genauere Daten zum historischen Überflutungsgeschehen, höhere Auflösung des digitalen Geländemodells)

Weiterer Forschungsbedarf besteht darüber hinaus in der Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Klassifizierungsmethoden bezüglich der Überflutungsgefahr und der Überflutungsgefährdung auf die abgeleitete Gefährdungsaussage. Auch hier sind konkrete Vorgaben zu entwickeln. Die vorliegende Untersuchung basiert ausschließlich auf einer einzigen Methode zur gebäudespezifischen Gefährdungsklassifizierung. Inwieweit abweichende Ansätze Einfluss auf die Gefährdungsaussage haben, bleibt zu untersuchen. Im Zuge der zunehmenden Digitalisierung ist zukünftig eine entsprechende hochaufgelöste Datenlage zu erwarten (z.B. zu Gebäudezugängen und Kellerfenstern). Diese Datengrundlage könnte die Methoden zur gebäudespezifischen Gefährdungsklassifizierung deutlich erweitern.

Mit fortschreitender Entwicklung von Rechen- und Speicherkapazitäten sowie ansteigender Verfügbarkeit und Auflösung überflutungsrelevanter Geodaten (Abily et al. 2016) ist eine kontinuierliche Anpassung der Vorgaben empfehlenswert. Gleichzeitig ist unter dieser Voraussetzung eine Prüfung des Einsatzes bi-direktional gekoppelter Modelle auch für geringere Niederschlagsbelastungen bis hin zum Belastungsfall „Bemessungsregen“, wie auch schon in (Fuchs & Schmidt 2015a) vorgeschlagen, denkbar.

Mit der Methode der bi-direktional gekoppelten Abflusssimulation steht ein mächtiges und mittlerweile praktikables Instrument zur Verfügung, dem zugetraut werden kann, das komplexe Phänomen starkregeninduzierter Überflutungen in Siedlungsgebieten abbilden zu können. Nun kommt es auf den Anwender an, dieses Werkzeug überlegt und verantwortungsbewusst einzusetzen, um damit verlässlich warnen und elegant planen zu können.

## Literaturverzeichnis

- Abily, M.; Delestre, O.; Bertrand, N.; Duluc, C.; Gourbesville, P. (2016): High-resolution modelling with bi-dimensional shallow water equations based codes – high-resolution topographic data use for flood hazard assessment over urban and industrial environments. Proceedings of the 12th International Conference on Hydroinformatics, (HIC 2016), 21.-26. August 2016, Incheon, Korea.
- ADV (2016): Produktblätter ATKIS – Digitale Geländemodelle. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, Online-Quelle: <http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Geotopographie/Digitale-Gelaendemodelle/>, Zugriff 29.12.2017, Dezember 2016.
- Aigner, D.; Bollrich, G. (2015): Handbuch der Hydraulik. ISBN 978-3-410-21341-3, Verlag: Beuth, Auflage: 1., 2015, Berlin.
- ATV-DVWK (2004): Anforderungen an Niederschlag-Abfluss-Berechnungen in der Siedlungsentwässerung. ATV-DVWK-Merkblatt 165, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Januar 2004, Hennef.
- ATV-DVWK-Arbeitsgruppe ES-2.1 (2004): Arbeitsbericht „Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit bestehender Entwässerungssysteme“. In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (51), Nr. 1, S. 69-76.
- BBSR (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung – Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte. Ergebnisbericht der fallstudiengestützten Expertise „Klimaanpassungsstrategien zur Überflutungsvorsorge verschiedener Siedlungstypen als kommunale Gemeinschaftsaufgabe“, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2015, Bonn.
- Beffa, C. (2017): Vorlesung Hydraulik II 2D-Flachwassergleichungen, Online-Quelle: [https://www.fluvial.ch/m/2D\\_Flachwasser\\_Skript.pdf](https://www.fluvial.ch/m/2D_Flachwasser_Skript.pdf), Zugriff 29.12.2017, 2017.
- Behnen, K.; Koch, M.; Jeskulke, M.; Hoppe, H. (2017): KLAS II – Erfahrungsaustausch in Bremen zur Veröffentlichung von Informationen zu Starkregengefahren. In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (64), Nr. 3, S. 198.
- BMBF (2008): Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS). Förderprogramm des BMBF: Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse (RIMAX), Auftraggeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung, Förderkennzeichen 0330701 C, Online-Quelle: <http://www.urbanesturzfluten.de/schlussbericht/schlussbericht/view>, Zugriff 29.12.2017, 2008, Aachen.
- BMI (2011): Schutz Kritischer Infrastrukturen – Risiko- und Krisenmanagement Leitfaden für Unternehmen und Behörden. Bundesministerium des Inneren, Mai 2011, Berlin.

- Buchholz, O.; Hatzfeld, F.; Mittelstädt, R.; Yörük, A (2015): Vorbereitet sein auf urbane Sturzfluten – Verfahren zur Entwicklung kommunaler Schutzkonzepte auf Basis der 2D-Modellierung mit HYDRO\_AS-2D. In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (62), Nr. 2, S. 138–144.
- Butler, D; Davies, J. W. (2011): Urban Drainage. 3rd. Edition, ISBN 978-0-415-45526-8, Spoon Press, 2011, New York, USA.
- Chau K. W. (1990): Application of the Preissman scheme on flood propagation in river systems in difficult terrain. Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990, IAHS Publ. no. 193, Online-Quelle: [http://hydrologie.org/redbooks/a193/iahs\\_193\\_0535.pdf](http://hydrologie.org/redbooks/a193/iahs_193_0535.pdf), Zugriff 29.12.2017, 1990, Switzerland.
- Chow, V. T. (1959): Open-channel hydraulics. McGraw-Hill Book Company, 680 p., New York.
- DBU (2017a): Multifunktionale Retentionsflächen. Schlussbericht des Forschungsprojekts MURIEL, Auftraggeber Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), AktenzeichenAZ32223/01, 2017, Osnabrück.
- DBU (2017b): Praxisleitfaden – Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen. Teilergebnis des Forschungsprojekts KLAS II, Auftraggeber Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), AktenzeichenAZ32372/01, Online-Quelle: [https://www.klas-bremen.de/sixcms/media.php/13/KLAS\\_Praxisleitfaden\\_DIN\\_A4.12560.pdf](https://www.klas-bremen.de/sixcms/media.php/13/KLAS_Praxisleitfaden_DIN_A4.12560.pdf), Zugriff 29.12.2017, 2017, Osnabrück.
- Delaunay, B. N. (1934): Sur la sphère vide. In: Bulletin of Academy of Sciences of the USSR. 7, Nr. 6, 1934, S. 793–800.
- De Sousa, L. M.; Chen, A. S.; Gibson, M. J.; Savic, D. A.; Leitao, J. P. (2017): Exploring the advantages of hexagonal rasters for flood modelling using cellular automata. Proceedings of the 14th International Conference on Urban Drainage (ICUD 2017), 10.-15. September 2017, Prague, Czech Republic.
- DHI (2008): Mouse, Runoff. Reference Manual, Mike by DHI, 2008, Horsholm, Denmark.
- DIN 1986-100 (September 2016): Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056.
- DIN 12056 (Januar 2001): Schwerkraftentwässerungsanlagen innerhalb von Gebäuden. Deutsche Fassung EN 12056:2000; alle Teile.
- DIN EN 752 (April 2008): Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden. Deutsche Fassung EN 752:2008.
- DIN EN 752 (Juli 2017): Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden. Deutsche Fassung EN 752:2017.
- Djordjevic, S.; Prodanovic, D.; Maksimovic, C. (1999): An approach to simulation of dual drainage. Water Science & Technology, Vol 39 (9), 1999, pp. 95 – 103, IWA Publishing, 1999, London, UK.
- DSt (2015): Starkregen und Sturzfluten in Städten – eine Arbeitshilfe. Deutscher Städtetag (Hrsg.), April 2015, Berlin und Köln.

- DWA (2006): Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. DWA-Arbeitsblatt 118, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Dezember 2006, Hennef.
- DWA (2008): Prüfung der Überflutungssicherheit von Entwässerungssystemen. Arbeitsbericht der DWA-AG ES-2.5. In: KA Abwasser, Abfall (55), Nr. 9, S. 972–976.
- DWA (2013): Starkregen und urbane Sturzfluten – Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge. DWA-Themen, T1/2013.
- DWA (2016): Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen. DWA-Merkblatt 119, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Dezember 2016, Hennef.
- Fuchs, L. (2013): Gefährdungsanalyse zur Überflutungsvorsorge kommunaler Entwässerungssysteme. Konferenzbeitrag zur Konferenz „Sanierung und Anpassung von Entwässerungssystemen – Alternde Infrastruktur und Klimawandel“, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Volume: 1, 2013, Wien.
- Fuchs, L.; Schmidt, N.(2015a): Vergleich von 2-dimensionalen Berechnungsansätzen für die Gefährdungsanalyse in urbanen Gebieten. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Heft 5-6, S.187-196.
- Fuchs, L.; Schmidt, N. (2015b): Was taugen die gebräuchlichen Berechnungsansätze zur Gefährdungsanalyse in urbanen Gebieten? Konferenzbeitrag zur Aqua Urbanica 2015 (AU 2015) und zum 90. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium der Universität Stuttgart, 07.-08. Oktober 2015, Stuttgart.
- Gamerith, V.; Sackl, B. J.; Scaria, T. (2017): 2d-hydraulische Modellierung von Hangwassereinzugsgebieten im stadtnahen Bereich. Konferenzbeitrag zur Aqua Urbanica 2017 (AU 2017), 02.-03. Juli 2017, Graz, Österreich.
- Gatke, D.; Thielking, K.; Hoppe, H.; Kirschner, N.; Koch, M.; Behnken, K. (2015): Extreme Regen im urbanen Raum – Stadtgebietsweite Überflutungsbetrachtungen und Detailanalysen in Bremen. In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (62), Nr. 2, S. 150–156.
- Geoportal Berlin / ALK (2016): Geobasisdaten der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin.
- Geoportal Rheinland-Pfalz (2016): Geobasisdaten der Geodateninfrastruktur Rheinland-Pfalz des Landesamts für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz, Koblenz.
- Gibson, M. J.; Savic, D. A.; Djordjevic, S.; Chen, A. S.; Fraser, S.; Watson, T. (2016): Accuracy and computational efficiency of 2D urban surface flood modelling based on cellular automata. Proceedings of the 12th International Conference on Hydroinformatics, (HIC 2016), 21.-26. August 2016, Incheon, Korea.
- GDV (2015): Naturgefahrenreport 2015 – Die Schadens-Chronik der deutschen Versicherer mit Zahlen, Stimmen und Ereignissen. GDV Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Berlin.

- Heck, F. (2017): Untersuchung von Berechnungsansätzen in der Überflutungssimulation unter Ableitung von Anwendungsempfehlungen bei der Gefährdungsanalyse für urbane Starkregenüberflutungen. Diplomarbeit am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 2017, Kaiserslautern.
- Hsu, Y.; Prinsen, G.; Bouaziz, L.; Lin, Y.; Dahm, R. (2016): An investigation of DEM resolution influence on flood inundation simulation. Proceedings of the 12th International Conference on Hydroinformatics, (HIC 2016), 21.-26. August 2016, Incheon, Korea.
- Hürter, H.; Riechel, M.; Schütze, M.; Waschnewski, J.; Schmitt, T.G.; Stapf, M.; Philippon, V.; Pawlowsky-Reusing, E. (2015): Integrated modelling and evaluation of adaptation measures in a metropolitan wastewater system. Proceedings of the 10th Urban Drainage Modelling Conference, 21.-23. September 2015, Quebec, Canada.
- Hürter, H.; Schmitt, T.G. (2016): Die bunte Welt der Gefahrenkarten bei Starkregen – Ein Methodenvergleich. Tagungsband der Konferenz Aqua Urbanica 2016 „Miss es oder vergiss es“ – Daten, Wissen und Konzepte für den Gewässerschutz bei Regenwetter, 26. und 27. September 2016, Rigi Kaltbad, Schweiz.
- Hürter, H.; Schmitt, T.G. (2017): Street inlets in urban flood simulations – approaches, sensitivities and results. Proceedings of the 14th International Conference on Urban Drainage, 10.-15. September 2017, Prague, Czech Republic.
- Illgen, M. (2015): Kommunale Überflutungsvorsorge: von der Pflichtaufgabe zum aktiven Risikomanagement. Wassertage Münster, 24.-25. Februar 2015, Münster.
- Innovyze (2013): InfoWorks CS/2D Version 14.0. Reference Manual, 2013, Denver, Colorado, USA.
- IPCC (2012): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel [Field, C. B.; Barros, V.; Stocker, T. F.; Qin, D.; Dokken, D. J.; Ebi, K. L.; Mastrandrea, M. D.; Mach, K. J.; Plattner, C. K.; Allen, S. K.; Tignor, M.; Midgley, P. M. (Hrsg.)], Sonderbericht der Arbeitsgruppen I und II des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen, Weltorganisation für Meteorologie, Genf, Schweiz, 24 Seiten (auf Arabisch, Chinesisch, Englisch, Französisch, Russisch und Spanisch), Deutsche Übersetzung durch die Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, 2015, Bonn.
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, C. K.; Tignor, M.; Allen, S. K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P. M. (eds.)], 1535 pp., Cambridge University Press, 2013, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Working Group II Contribution to the IPCC 5th Assessment Report – Changes to the Underlying Scientific/Technical Assessment, 2014.

- ITWM (2003): Ermittlung und Simulation des Fließverhaltens von Iller- und Ellerbach und ihrer Zuflussbereiche in einem festgelegten Untersuchungsgebiet. Abschlussbericht Forschungsprojekt, Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, 2003, Kaiserslautern.
- Jahanbazi, M.; Egger, U. (2014): Application and comparison of two different dual drainage models to assess urban flooding. *Urban Water Journal* 11 (7), 584-594, 2014.
- Joergensen, A. T.; Linde, J.; Rasmussen, S.; Brodback, D.; Hansen, S. (2014): Evaluation, use and results different levels of flooding calculations. Proceedings of the 13th International Conference on Urban Drainage (ICUD 2014), 07.-12. September 2014, Sarawak, Malaysia.
- Kemper, S.; Schlenckhoff, A.; Balmes, J. (2016): Determination of the interaction between surface flow and drainage discharge. *Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change – Erpicum et al. (Eds.)*, ISBN 978-1-138-02977-4, Taylor & Francis Group, 2016, London, UK.
- Khelil, A.; Semke, M. (1991): Quantifizierung der Unsicherheiten bei der Abflussberechnung in städtischen Entwässerungssystemen. Abschlussbericht des DFG geförderten Forschungsvorhabens, FKZ: DFG SI 242/7-2, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover, 1991, Hannover.
- Kindsvater, C. E.; Carter, R. W. C. (1957): Discharge characteristics of rectangular thin-plate weirs. *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 83, No.HY6. Paper 1453.
- KOSTRA-DWD-2010 (2010): Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2010). Deutscher Wetterdienst, 2015, Offenbach am Main.
- Königer, W.; Gniodorsch, L. (1983): Regenwanderung. In: Die Bedeutung der räumlichen Niederschlagsverteilung für den Abflussprozess in kleinen Einzugsgebieten, Mitteilung Heft 52, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover.
- Krieger, K.; Schmitt, T. G. (2015): Möglichkeiten der Risikokommunikation im Rahmen eines präventiven Risikomanagements für Starkregen und urbane Sturzfluten. In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (62), Nr. 2, S. 114-120.
- LANUV NRW (2013): Klimawandel in Stadtentwässerung und Stadtentwicklung – Methoden und Konzepte (KISS). Leitfaden: Handlungsoptionen für eine wassersensible Stadtentwicklung, Projektbericht. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW). Online-Quelle: [http://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/abwasser/KISS\\_Bericht.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/abwasser/KISS_Bericht.pdf), Zugriff 29.12.2017, 2013.
- Laurien, E.; Oertel jr., H. (2009): Numerische Strömungsmechanik, Grundgleichungen und Modelle – Lösungsmethoden, Qualität und Genauigkeit. 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, ISBN 978-3-8348-0533-1, Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, 2009, Wiesbaden.

- Leitao, J. P.; Simoes, N. E.; Pina, R. P.; Ochoa-Rodriguez, S.; Onof, C.; Sa Marquez, A. (2015): Stochastic evaluation of the impact of sewer inlets' hydraulic capacity on urban flooding. Proceedings of the 10th International Urban Drainage Modelling Conference (UDM 2015), 20.-23. September 2015, Quebec, Canada.
- LUBW (2000): Studie über die Verwendung von Radarmessungen bei der Kanalnetzbe-  
rechnung. Landesanstalt für Umweltschutz des Landes Baden-Württemberg, Fe-  
bruar 2000, Karlsruhe, Baden-Württemberg.
- LUBW (2016): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württem-  
berg. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg,  
Dezember 2016, Baden-Württemberg.
- Maas, H.-G. (2005): Akquisition von 3D-GIS-Daten durch Flugzeuglaserscanning, Karto-  
graphische Nachrichten, Vol. 55, Heft 1, S. 3-11, Institut für Photogrammetrie und  
Fernerkundung, Technische Universität Dresden, 2005, Dresden.
- Martin, A. (2011): Modelling Road Gullies. Paper presented at the 2011 International Flood  
and Modelling Conference, 20-21 July 2011, Wallingford, UK.
- MKULNV NRW (2016): Ableitung von extremen Niederschlagsereignissen im urbanen  
Raum: Leistungsfähigkeit von Straßeneinläufen. Abschlussbericht, Ministerium für  
Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes  
Nordrhein-Westfalen (MKULNV NRW). August 2016, Nordrhein-Westfalen.
- MKULNV/MBWSV NRW (2016): Konzept Starkregen NRW. Ministerium für Bauen,  
Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, Ministe-  
rium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des  
Landes Nordrhein-Westfalen, Dezember 2016, Nordrhein-Westfalen.
- Moy de Vitry, M.; Leitao, J. P.; Tokarczyk, P.; Rieckermann, J. (2014): Photogrammetrische  
Fernerkundung mit autonomen Mini-Drohnen in der Siedlungshydrologie. Konfe-  
renzbeitrag zur Aqua Urbanica 2014 (AU 2014), 23.-24. Oktober 2014, Innsbruck,  
Österreich.
- Moy de Vitry, M.; Dicht, S.; Leitao, J. P. (2017): floodX: urban flash flood experiments mon-  
itored with conventional and alternative sensors. *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 657-666,  
<https://doi.org/10.5194/essd-9-657-2017>, 2017.
- Paz, A. R.; Meller, A.; Silva, G. B. (2011): Coupled 1D-2D hydraulic simulation of urban  
drainage systems: model development and preliminary results. Proceedings of the  
12th International Conference on Urban Drainage (ICUD 2011), 11.-16. September  
2011, Porto Alegre, Brazil.
- Preissmann, M. A.; Cunge, J.A. (1961): Calculation of Wave Propagation on Electronic Ma-  
chines, 9th IAHR World Congress, Proceedings, pp. 656 – 664, Dubrovnik, 1961, Yu-  
goslavia.
- Price, R. K.; Vojinovic, Z. (2011): Urban Hydroinformatics, Data Models and Decision sup-  
port for Integrated Urban Water Management. ISBN 9781843392743, IWA Pu-  
blishing, 2011, London, UK.

- Roller, S.; Ferch, M.; Munz, C.-D.; Dumbser, M. (2005): Vortrag Numerische Grundlagen: Finite Differenzen, Finite Elemente, Finite Volumen. Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS) und Institut für Aerodynamik und Gasdynamik (IAG) an der Universität Stuttgart, Online-Quelle: [https://fs.hlrs.de/projects/par/par\\_prog\\_ws/2005D/cfd-05-b.pdf](https://fs.hlrs.de/projects/par/par_prog_ws/2005D/cfd-05-b.pdf), Zugriff 29.12.2017, 2005.
- Russo, B.; Gomez, M.; Tellez, J. (2013): Methodology to estimate the hydraulic efficiency of nontested continuous transverse grates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2013 (139), 864-871.
- Salvan, L.; Abily, M.; Gourbesville, P.; Schoorens, J. (2016): Drainage systems and detailed urban topography: towards operational 1D-2D modelling for stormwater management. *Proceedings of the 12th International Conference on Hydroinformatics, (HIC 2016)*, 21.-26. August 2016, Incheon, Korea.
- SEKL (2017): Persönliche Mitteilungen zum Überflutungsgeschehen in Modellgebiet 2 durch die Stadtentwässerung Kaiserslautern, 2017, Kaiserslautern.
- Schmitt, T. G.; Thomas, M.; Ettrich, N. (2004): Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *J. Hydrol.*, 299, 300-311, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.012>, 2004.
- Schmitt, T. G.; Thomas, M. (2005): Spezielle Fragestellungen beim Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit großstädtischer Entwässerungssysteme. In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (52), Nr. 7, S. 800-804.
- Schmitt, T. G. (2011): Risikomanagement statt Sicherheitsversprechen – Paradigmenwechsel auch im kommunalen Überflutungsschutz? In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (58), Nr. 1, S. 40-49.
- Schmitt, T. G. (2014): Ansätze zum „Risikomanagement Starkregen“ in der kommunalen Überflutungsvorsorge“. In: 13. Regenwassertage vom 01.-02. Juli 2014 in Dresden, 2014, Dresden.
- Shepherd, W.; Blanksby, J.; Doncaster, S.; Poole, T. (2011): Quantifying the effect of buildings and surface roughness on 2D flood modelling. *Proceedings of the 12th International Conference on Urban Drainage (ICUD 2011)*, 11.-16. September 2011, Porto Alegre, Brazil.
- Shewchuk, J. R. (2002): Delaunay Refinement Algorithms for Triangular Mesh Generation, *Computational Geometry: Theory and Applications* 22(1-3):21-74, May 2002.
- Sieker, F.; Kaiser, M.; Sieker, H. (2006): Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung im privaten, gewerblichen und kommunalen Bereich, Grundlagen und Ausführungsbeispiele. ISBN 3-8167-6975-6, Fraunhofer IRB Verlag, 2006, Stuttgart.
- StEB (2016): Wassersensibel planen und bauen in Köln – Leitfaden zur Starkregenvorsorge für Hauseigentümer, Bauwillige und Architekten. *Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR*, Dezember 2016, Köln.
- tandler.com GmbH (2016): Webinar GeoCPM: Wasseraustausch zwischen Kanal und Oberfläche. Webinar der Firma tandler.com GmbH vom 11.10.2016, Buch am Erlbach.

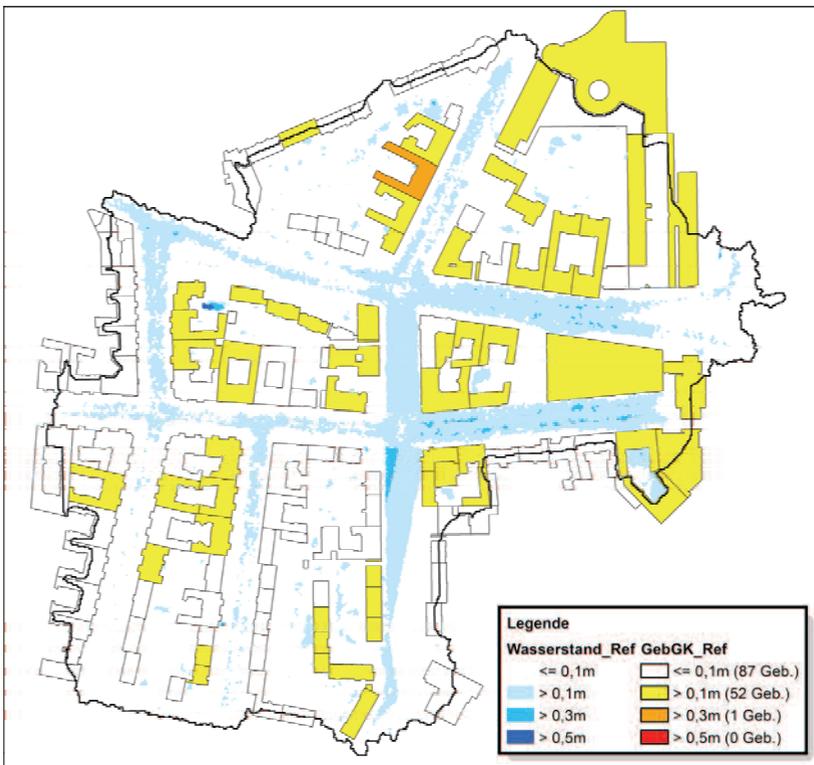
- Thomas, M.; Schmitt, T. G.; Gysi, H. (2003): Die Verwendung von radargemessenen Niederschlagsverteilungen in der Kanalnetzberechnung. GWF Wasser-Abwasser 4/2003, S. 302-308.
- UBA (2016): Klimaanpassung in der räumlichen Planung – Starkregen, Hochwasser, Massenbewegungen, Hitze, Dürre- Gestaltungsmöglichkeiten der Raumordnung und Bauleitplanung. Praxishilfe, Umweltbundesamt, November 2016, Dessau-Roßlau.
- Umakhanthan, K.; Ball, J. (2002): Estimation of rainfall heterogeneity across space and time scale. Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage (ICUD 2002), 08.-13. September 2002, Portland, USA.
- Vaes, G.; Willems, P.; Berlamont, J. (2002): Moving design storm for combined sewer systems. Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage (ICUD 2002), 08.-13. September 2002, Portland, USA.
- Van Dijk, E.; Van der Meulen, J.; Kluck, J.; Straatman, J. H. M. (2014): Comparing modelling techniques for analysing urban pluvial flooding. Water Science & Technology, Vol 69 (2), 2014, pp. 305 – 311, IWA Publishing, 2014, London, UK.
- Wahrheit-Lensing, A. (2010): Technische Hydromechanik II. Skript zur gleichnamigen Vorlesung an der Technischen Universität Kaiserslautern, 2010, Kaiserslautern.
- Willems, P. (1998): Stochastic generation of spatial rainfall for urban drainage areas. Proceedings of the 4th International Conference on Developments in Urban Drainage Modelling (UDM 1998), 21.-24. September 1998, London, UK.



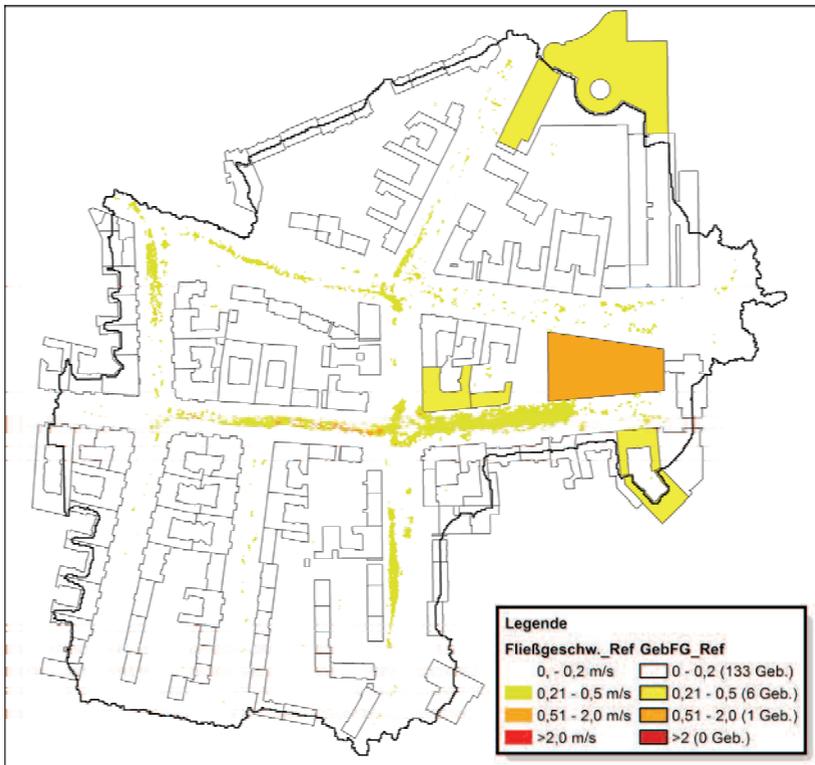
## Anhang

### Anhang A 1 Gefährdungskarten Modellgebiet 1

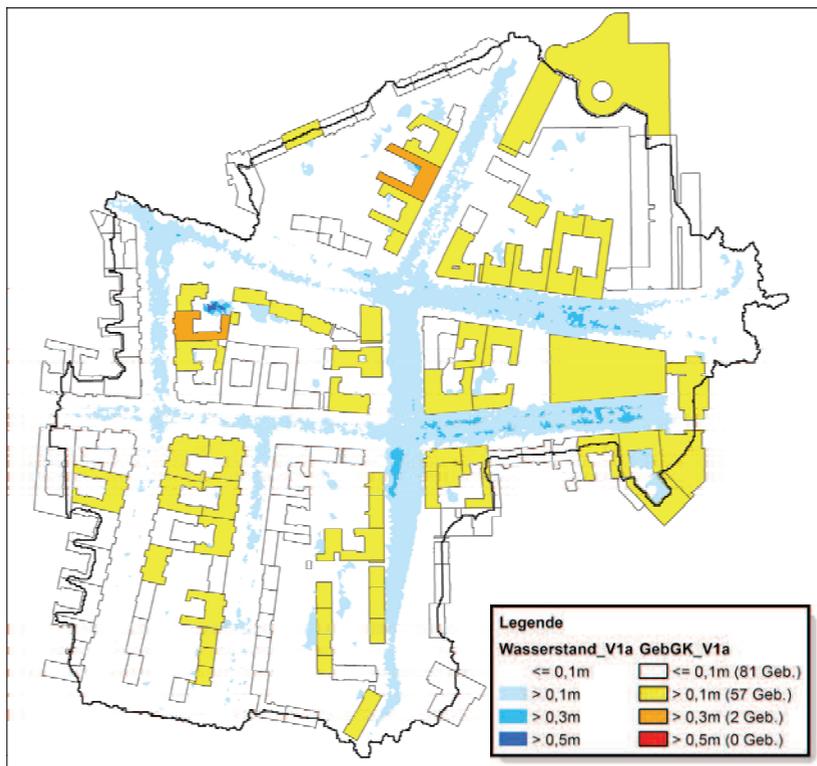
#### A.1.1 Referenzmodell – Gefährdungskarte Wasserstand



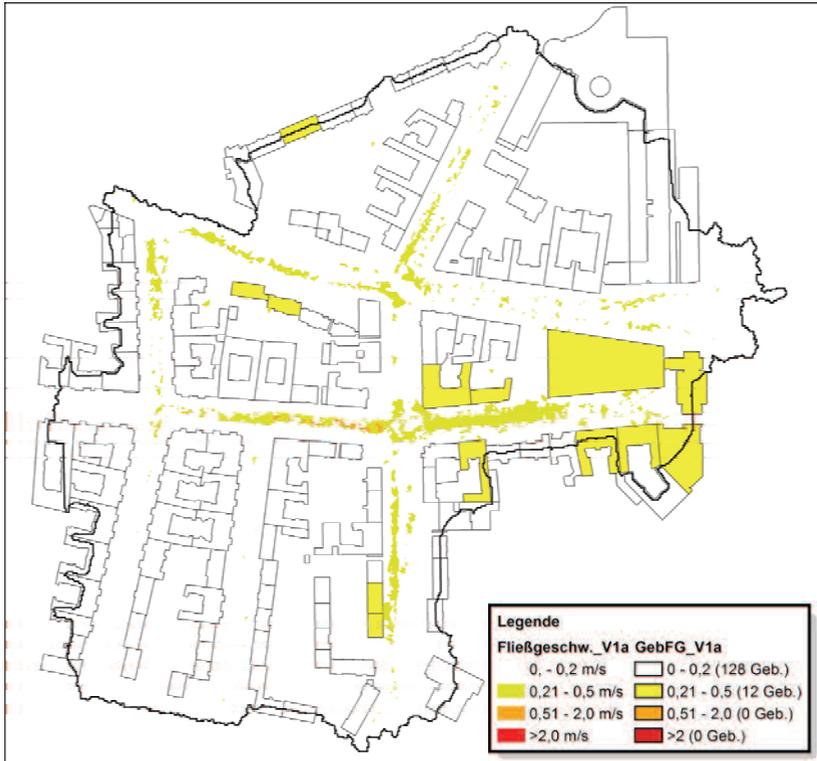
## A.1.2 Referenzmodell – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



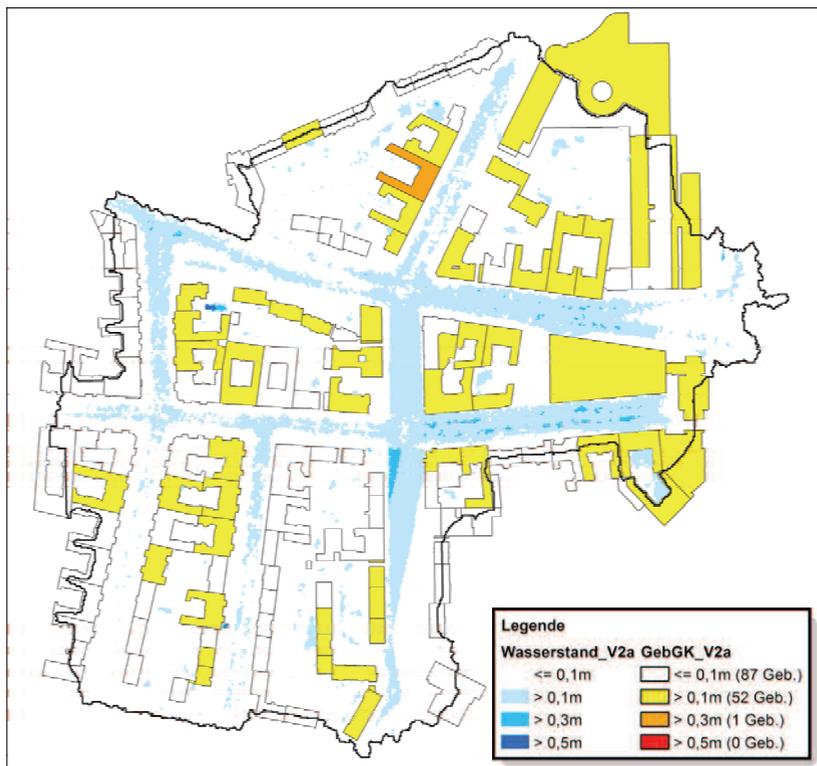
### A.1.3 Variante 1a – Gefährdungskarte Wasserstand



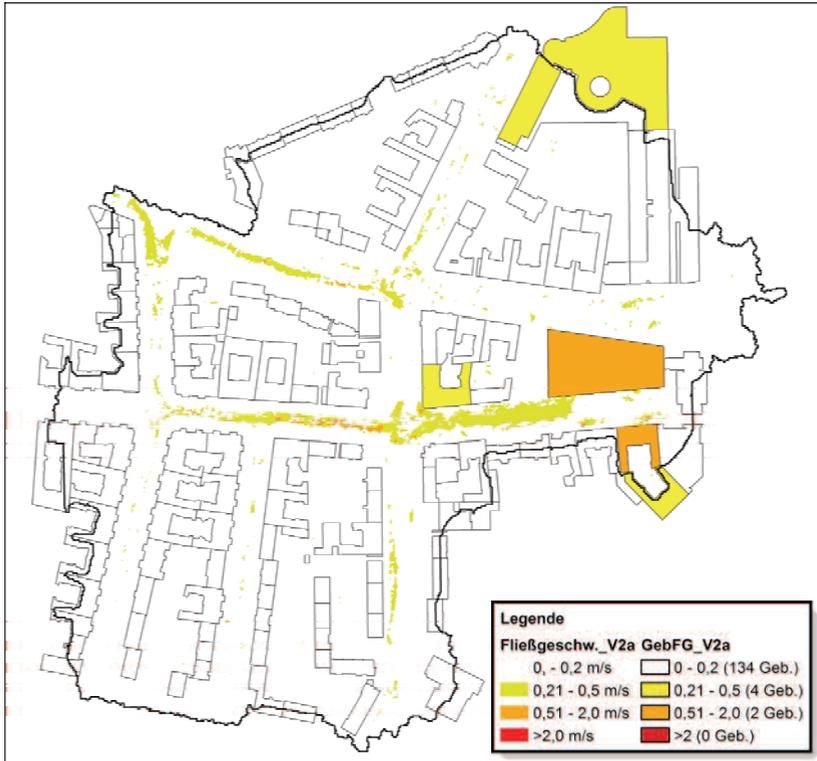
## A.1.4 Variante 1a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



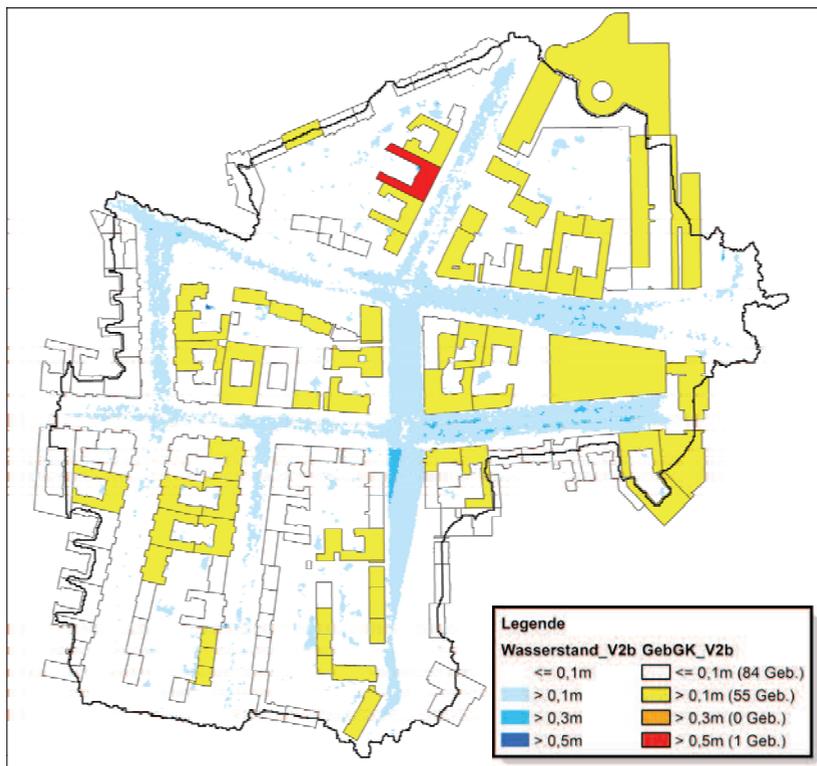
### A.1.5 Variante 2a – Gefährdungskarte Wasserstand



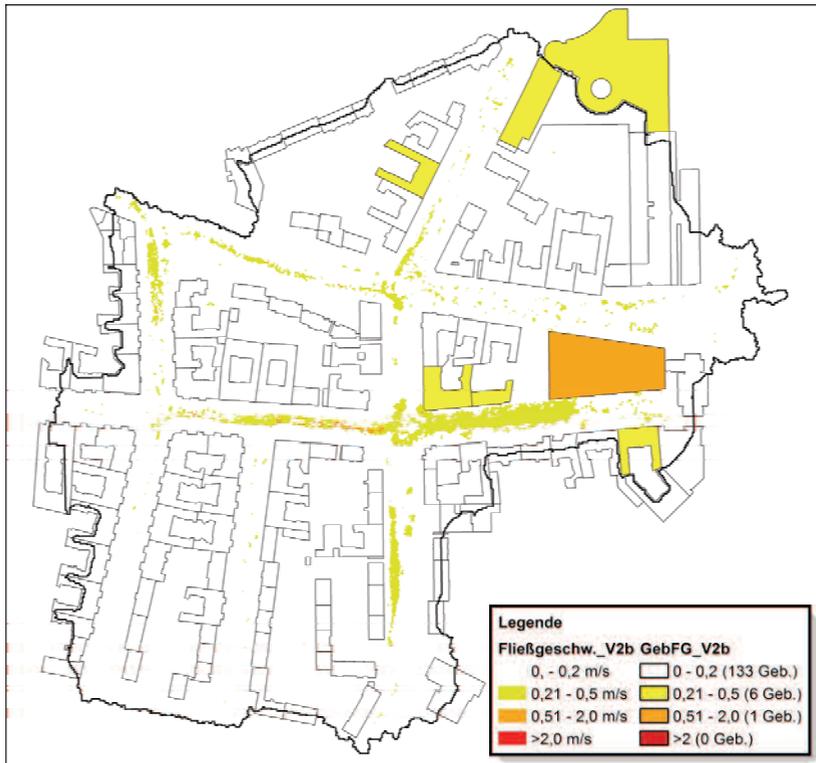
## A.1.6 Variante 2a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



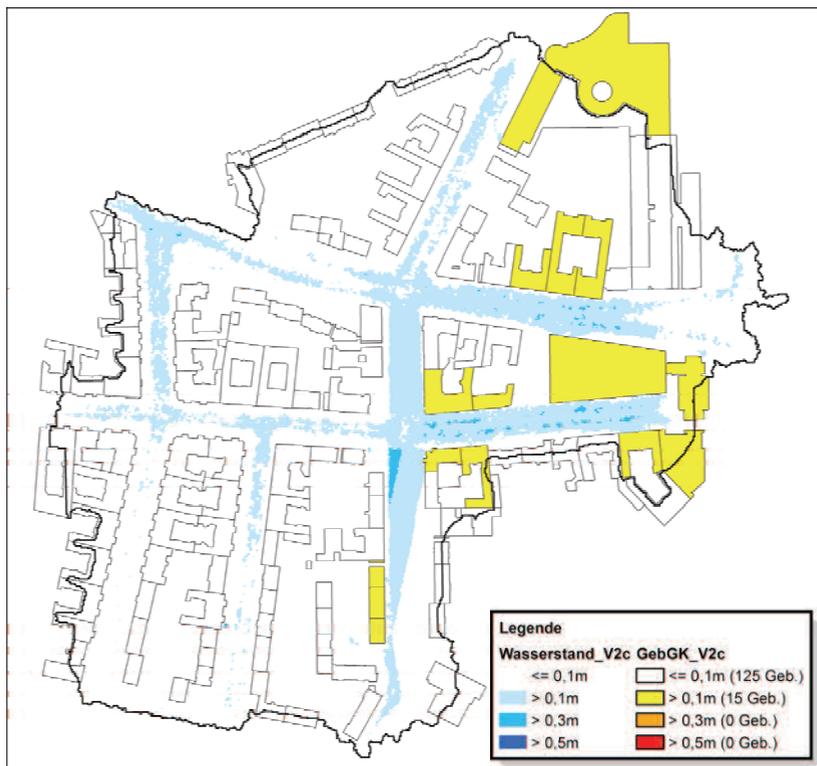
### A.1.7 Variante 2b – Gefährdungskarte Wasserstand



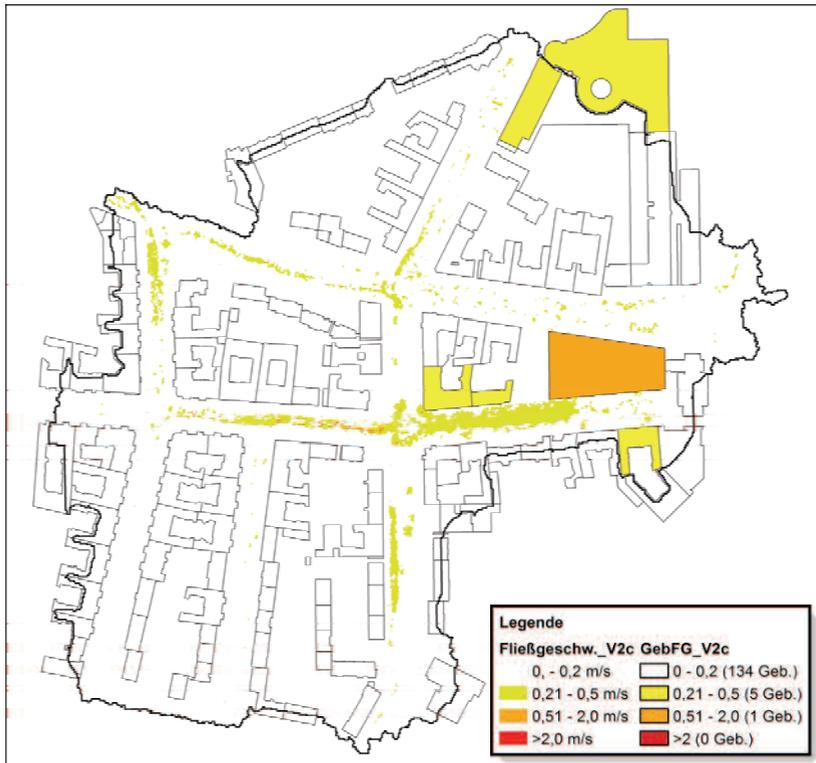
## A.1.8 Variante 2b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



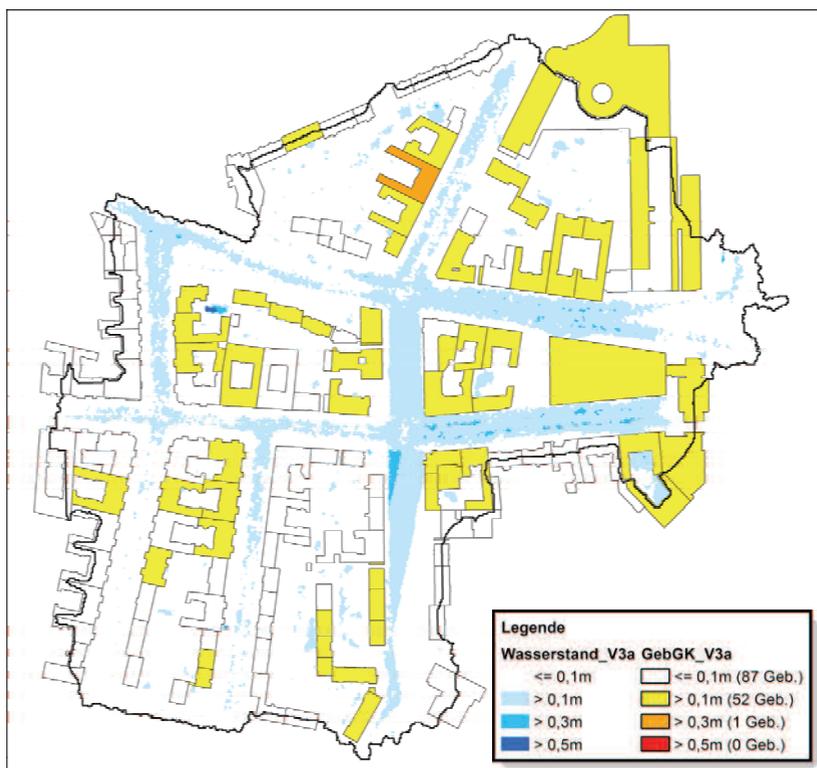
A.1.9 Variante 2c – Gefährdungskarte Wasserstand



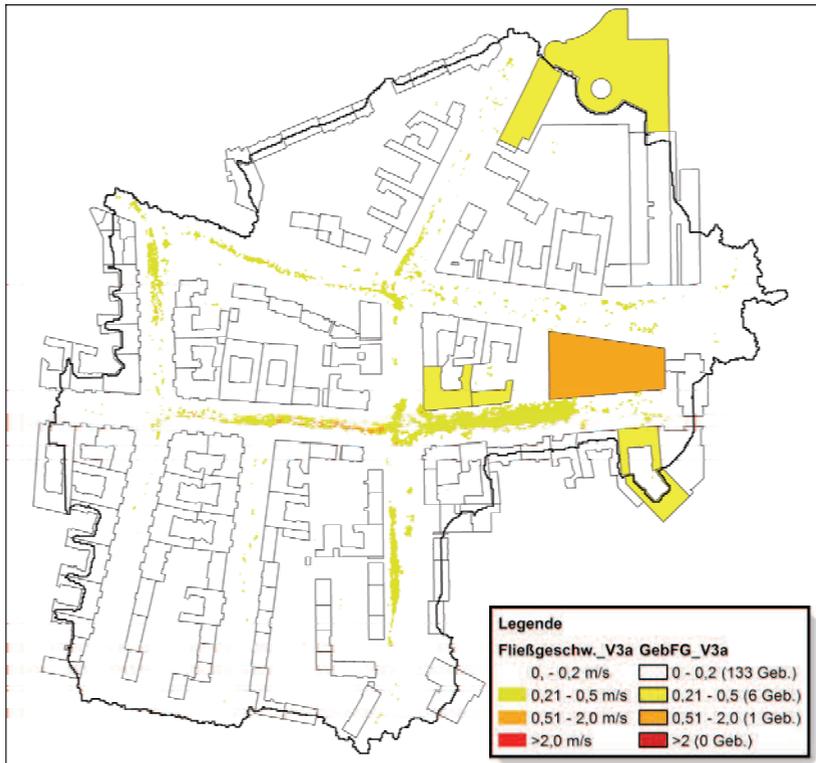
## A.1.10 Variante 2c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



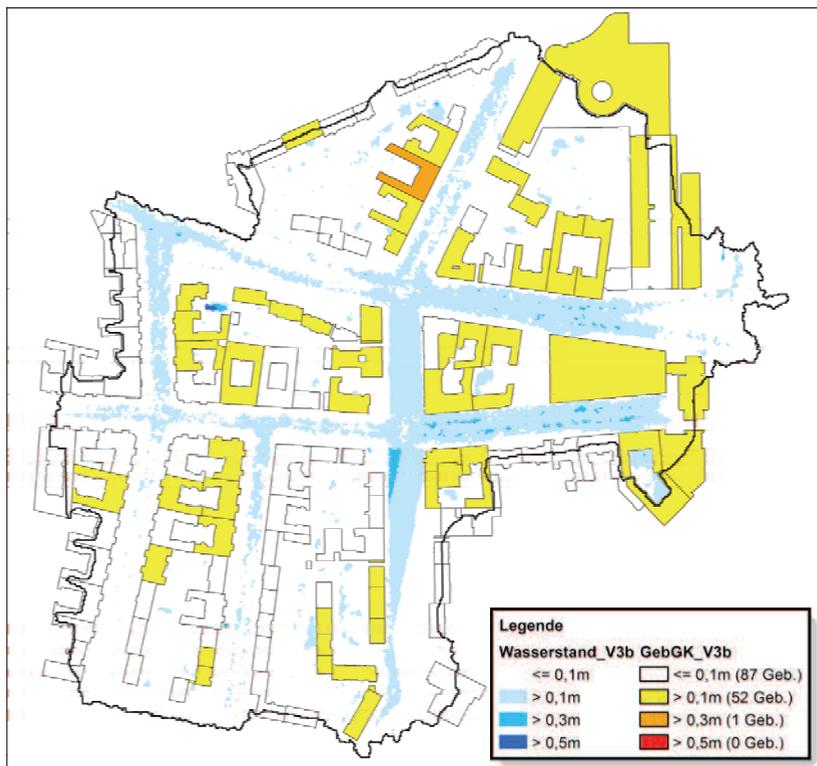
### A.1.11 Variante 3a – Gefährdungskarte Wasserstand



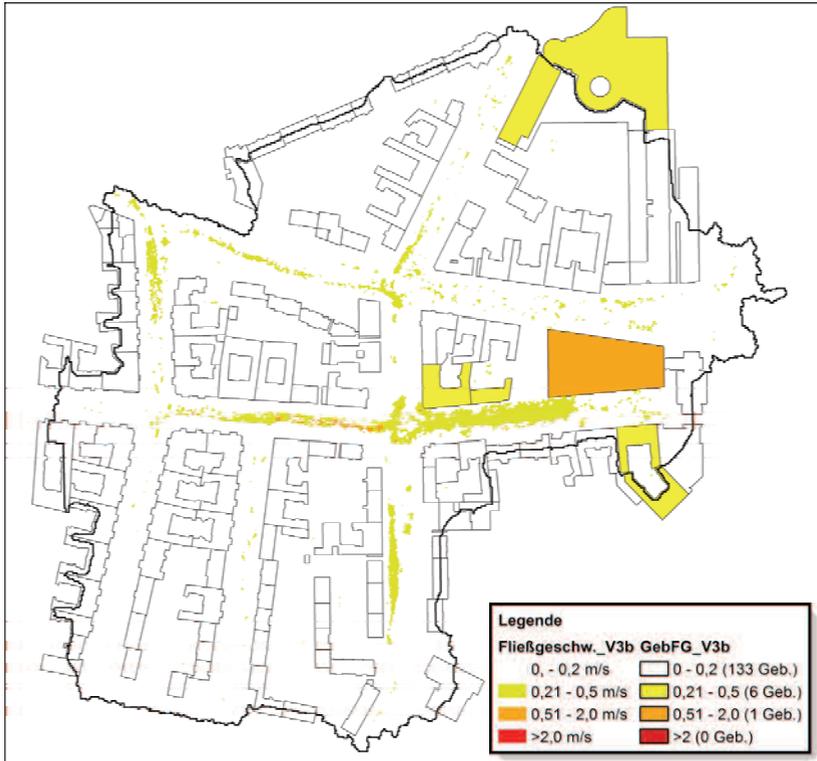
## A.1.12 Variante 3a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



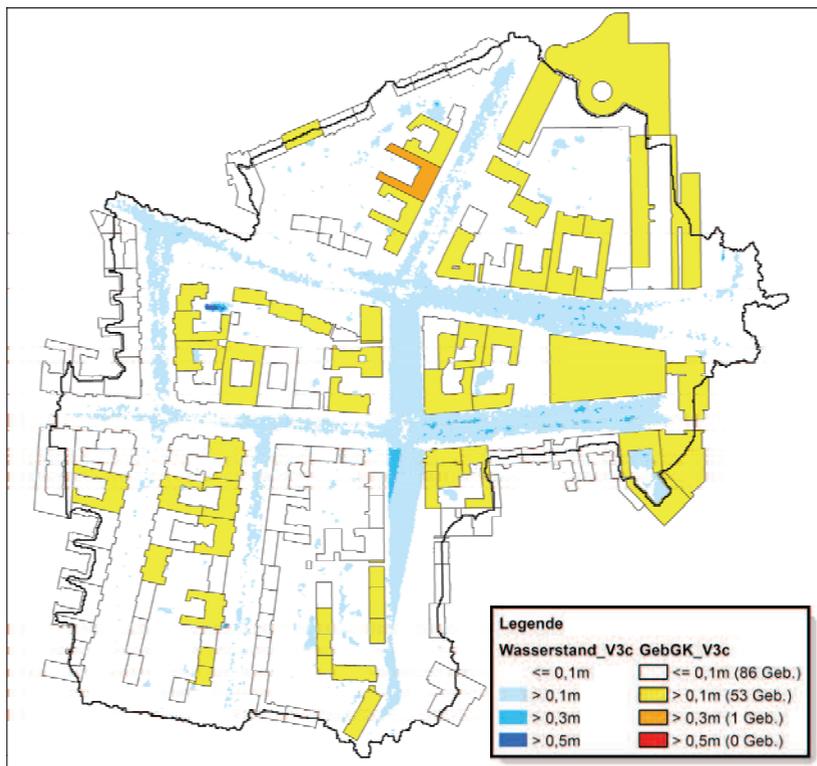
### A.1.13 Variante 3b – Gefährdungskarte Wasserstand



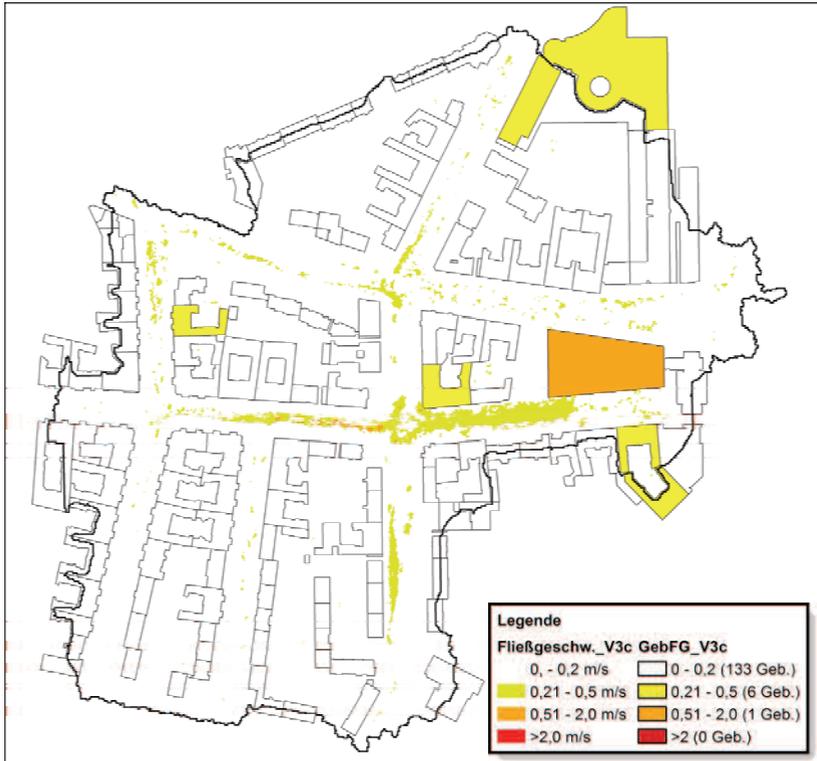
## A.1.14 Variante 3b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



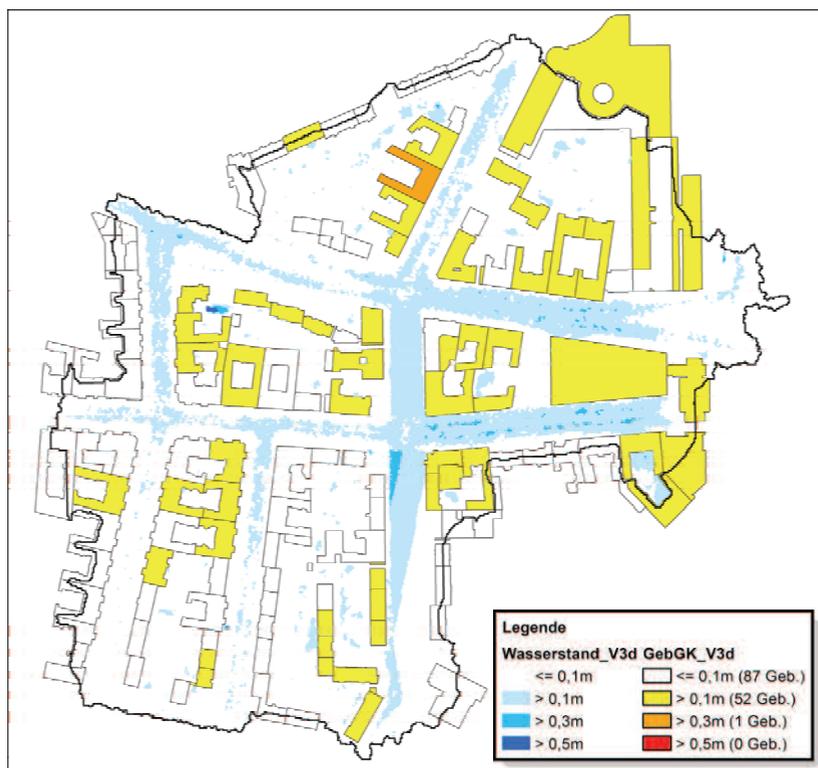
### A.1.15 Variante 3c – Gefährdungskarte Wasserstand



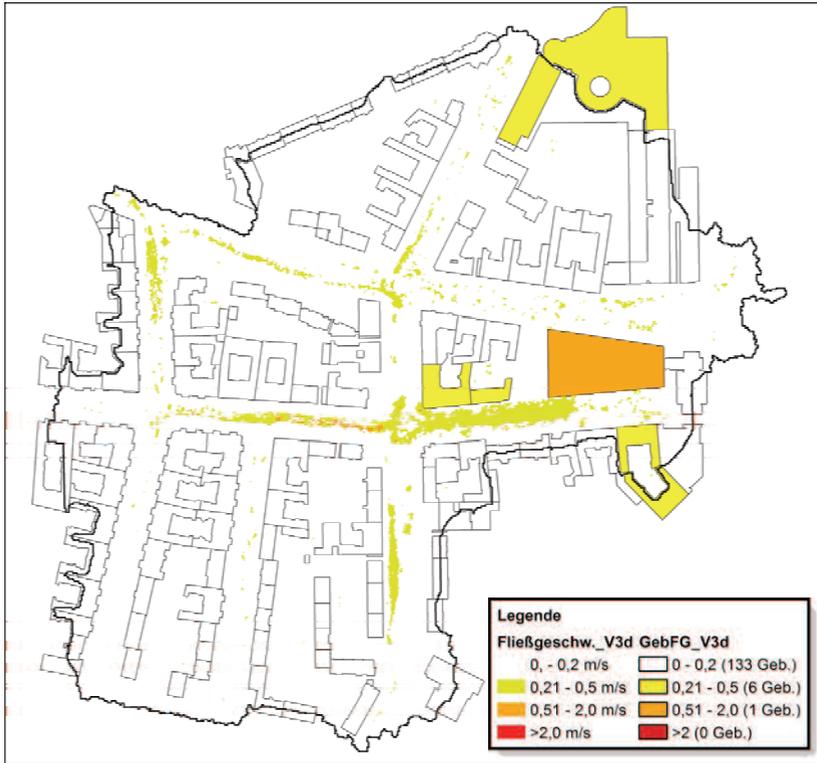
## A.1.16 Variante 3c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



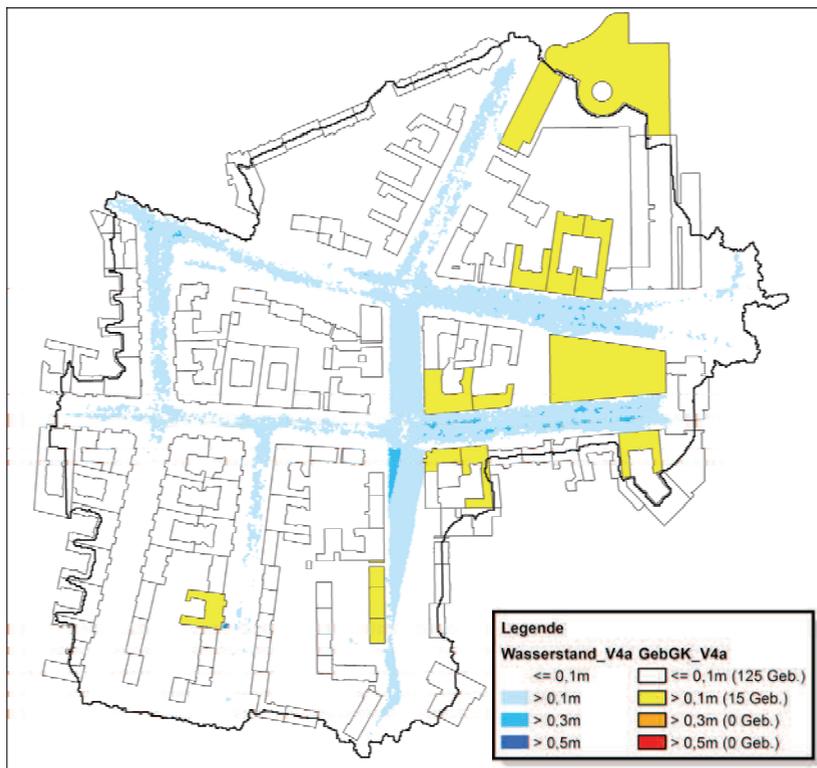
### A.1.17 Variante 3d – Gefährdungskarte Wasserstand



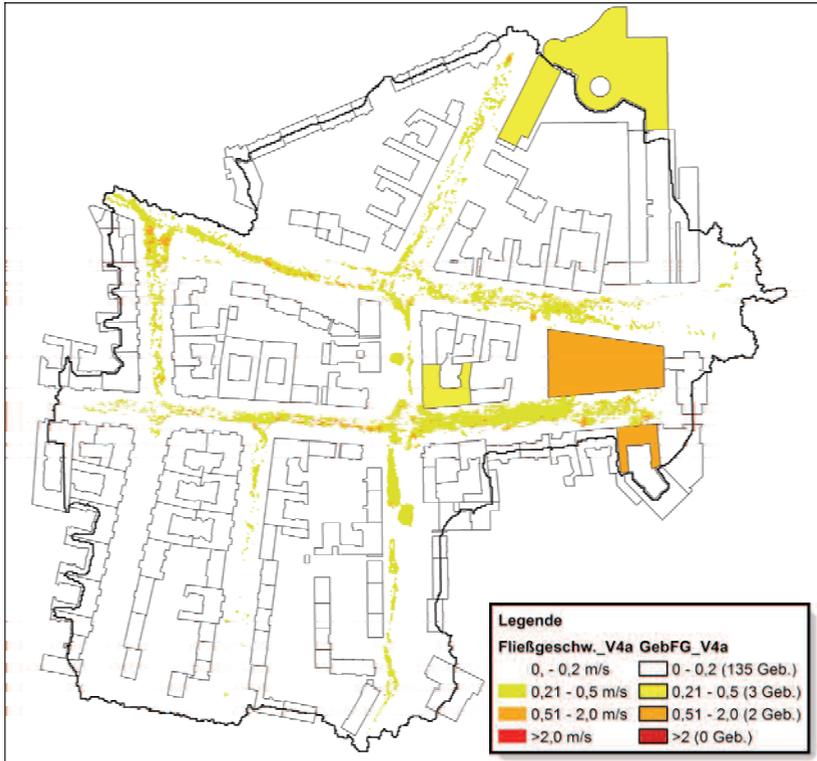
## A.1.18 Variante 3d – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



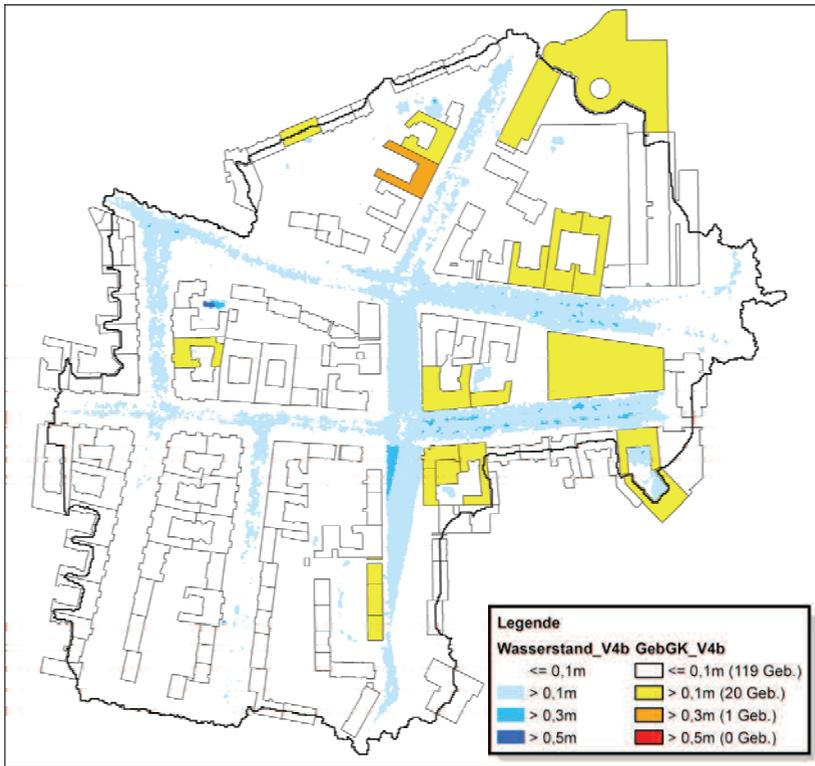
### A.1.19 Variante 4a – Gefährdungskarte Wasserstand



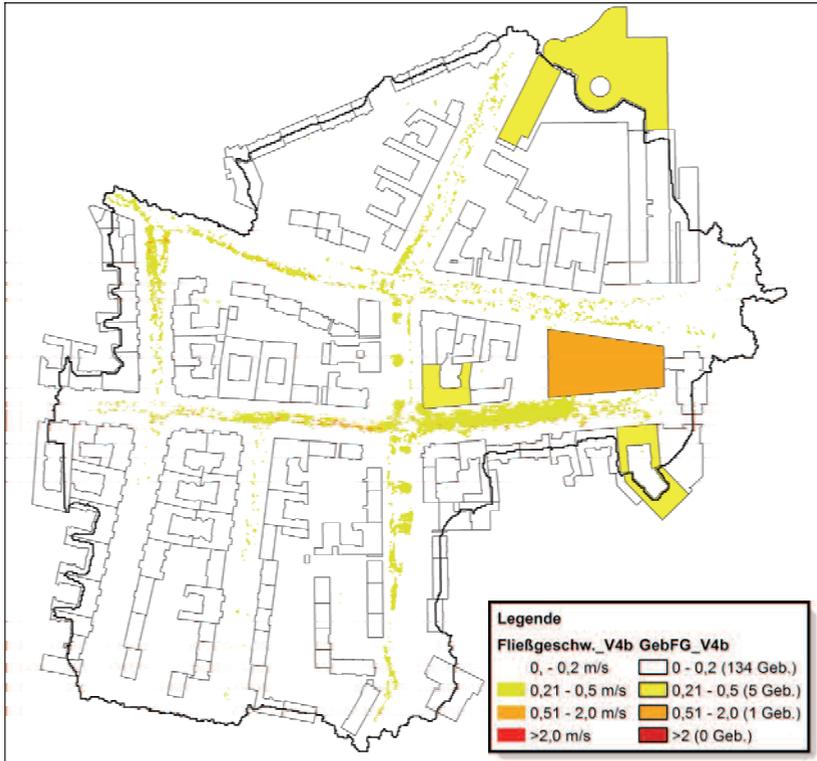
## A.1.20 Variante 4a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



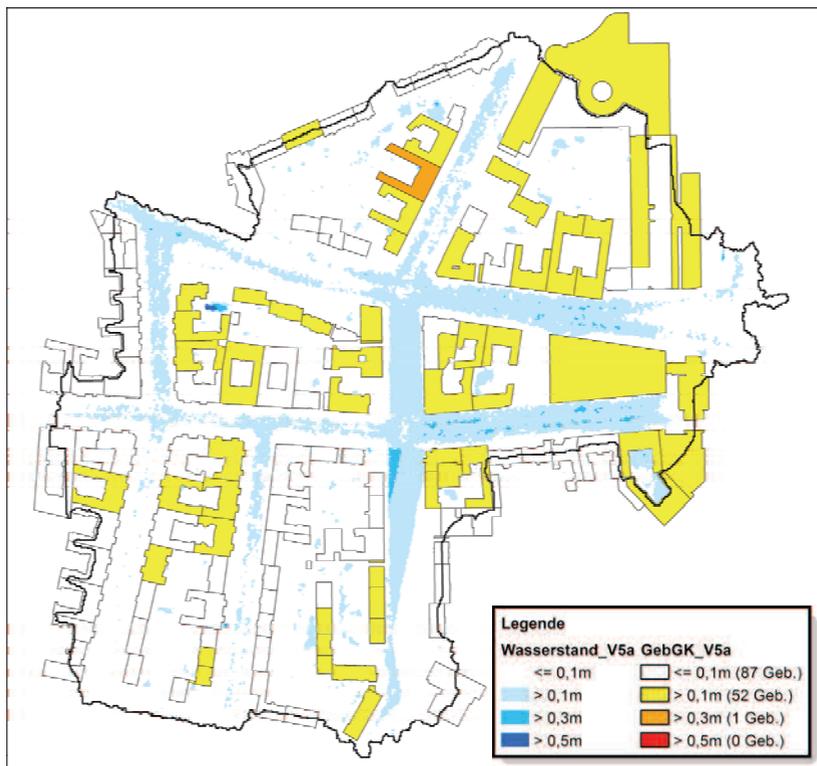
A.1.21 Variante 4b – Gefährdungskarte Wasserstand



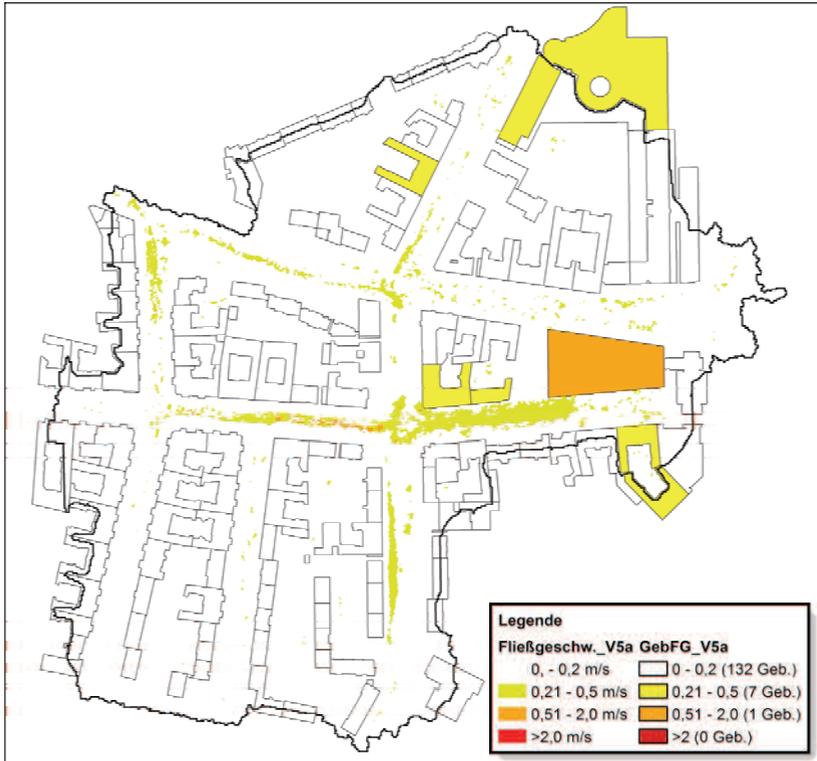
## A.1.22 Variante 4b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



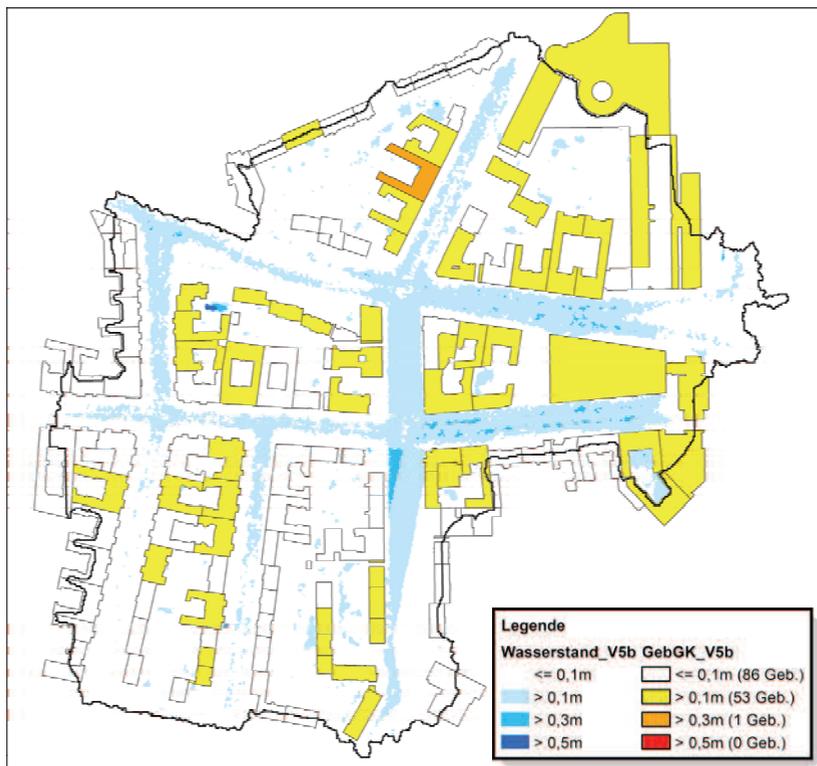
### A.1.23 Variante 5a – Gefährdungskarte Wasserstand



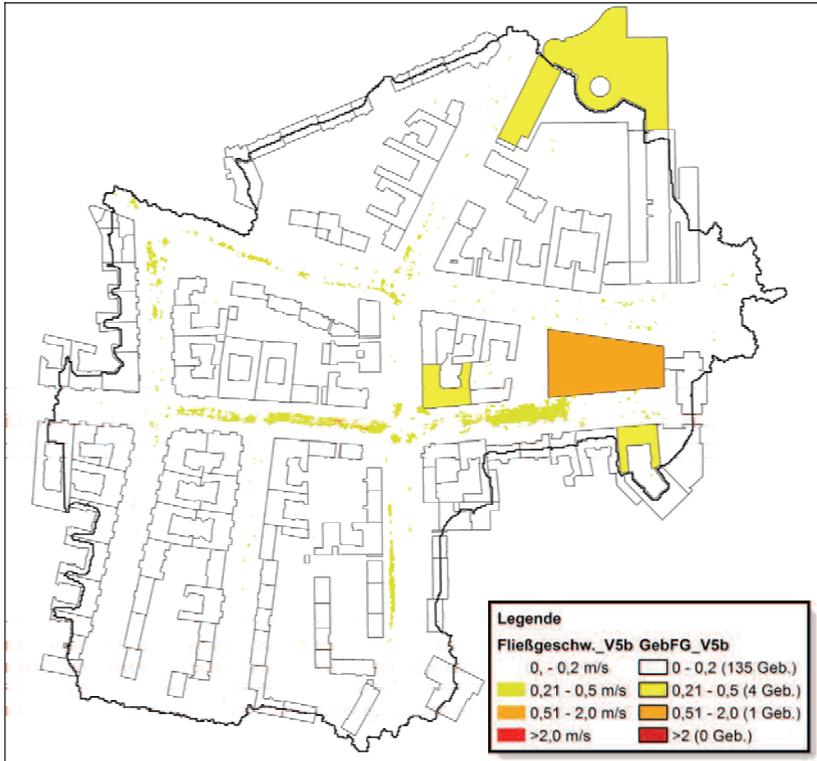
## A.1.24 Variante 5a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



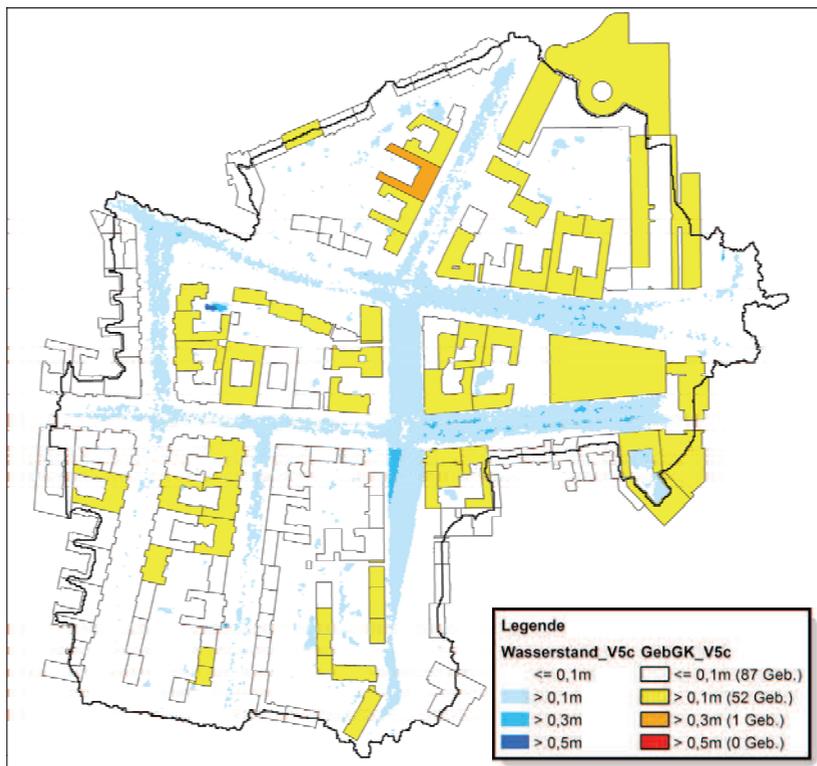
A.1.25 Variante 5b – Gefährdungskarte Wasserstand



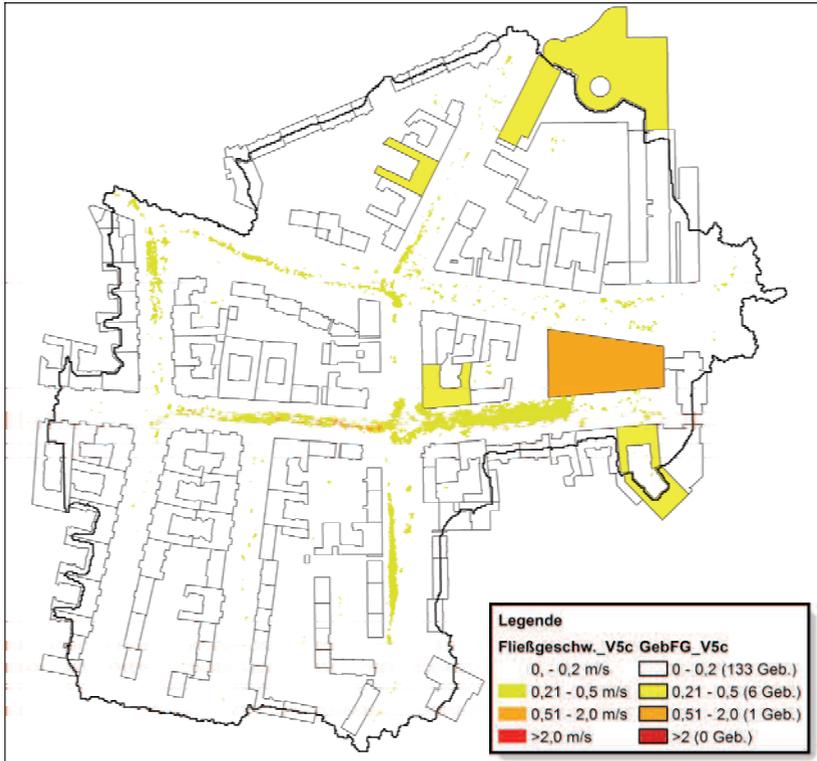
## A.1.26 Variante 5b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



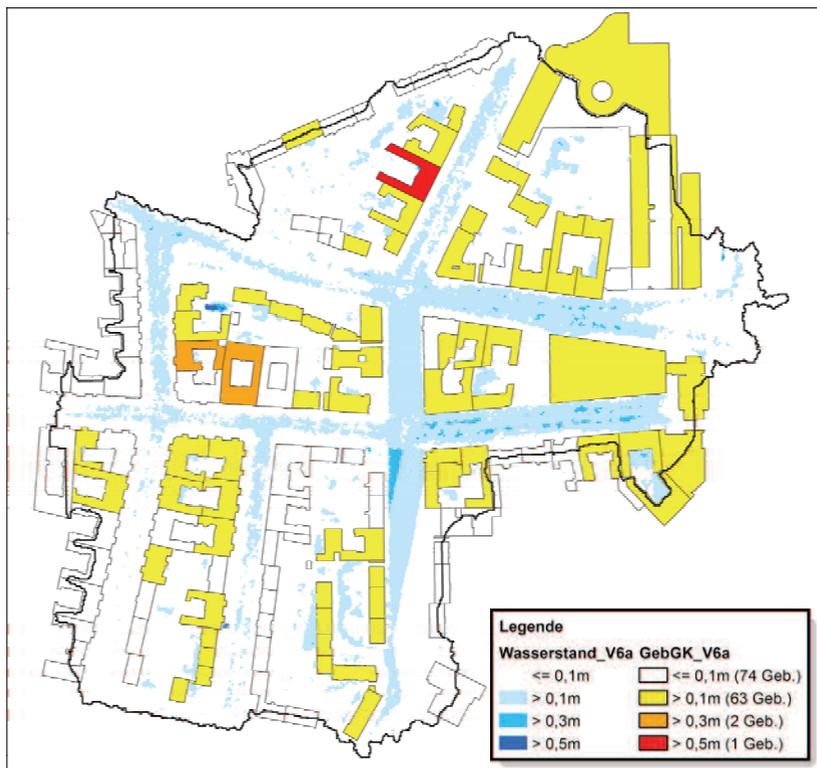
### A.1.27 Variante 5c – Gefährdungskarte Wasserstand



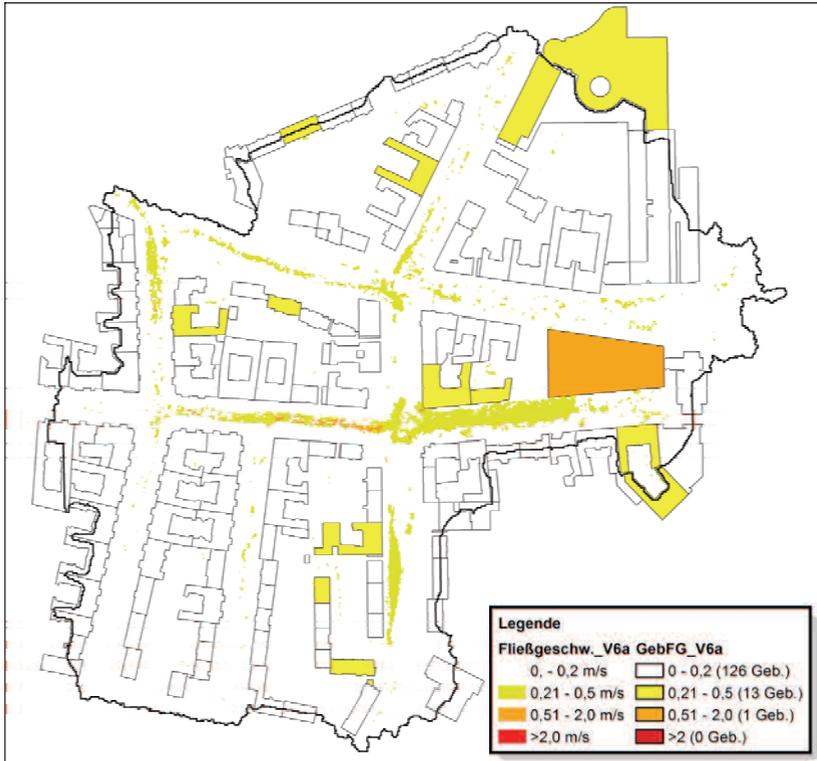
## A.1.28 Variante 5c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



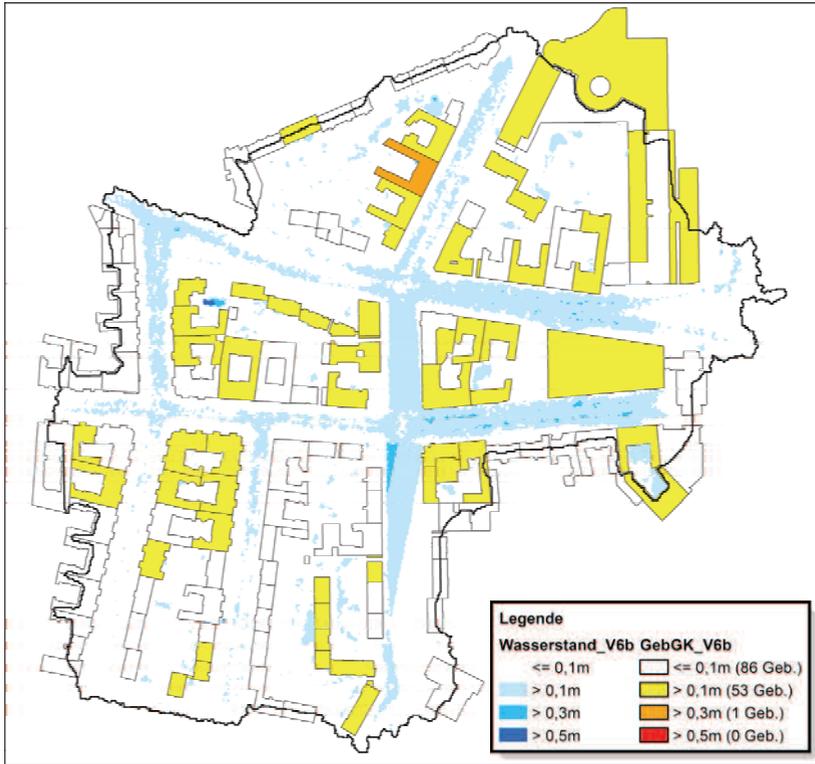
A.1.29 Variante 6a – Gefährdungskarte Wasserstand



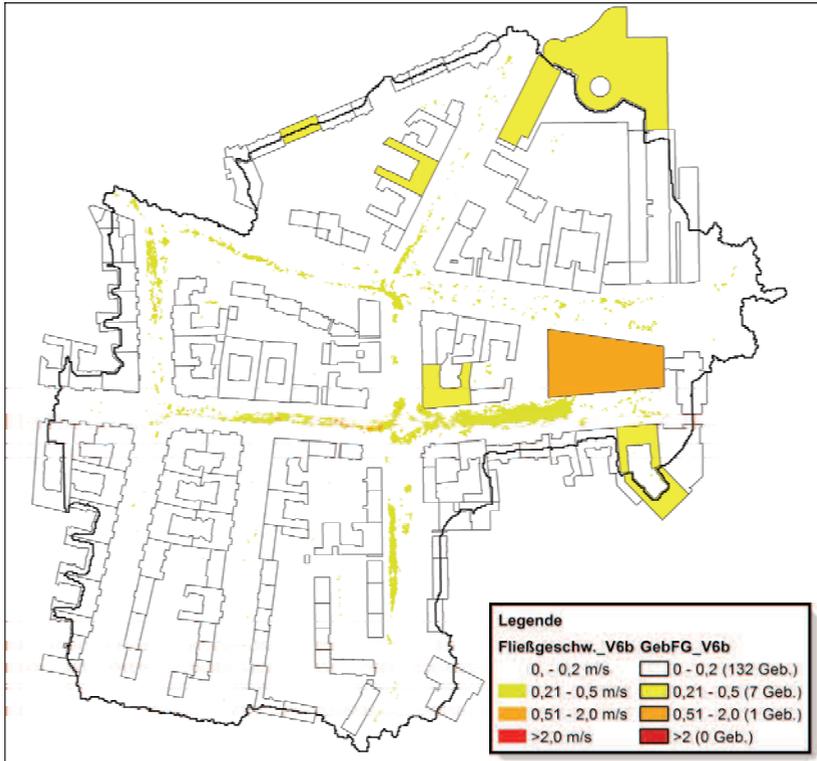
## A.1.30 Variante 6a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



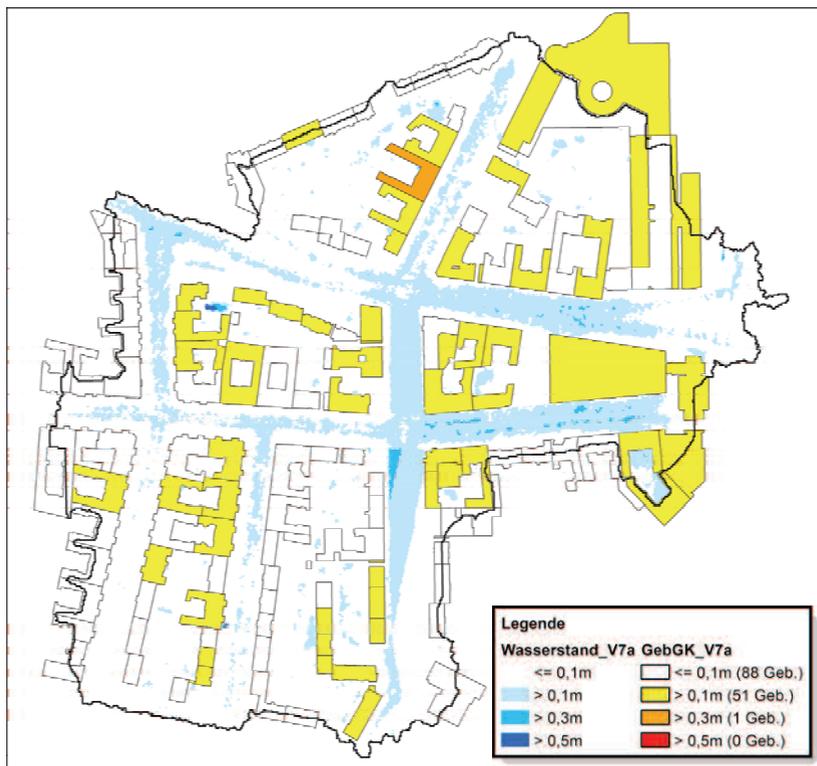
A.1.31 Variante 6b – Gefährdungskarte Wasserstand



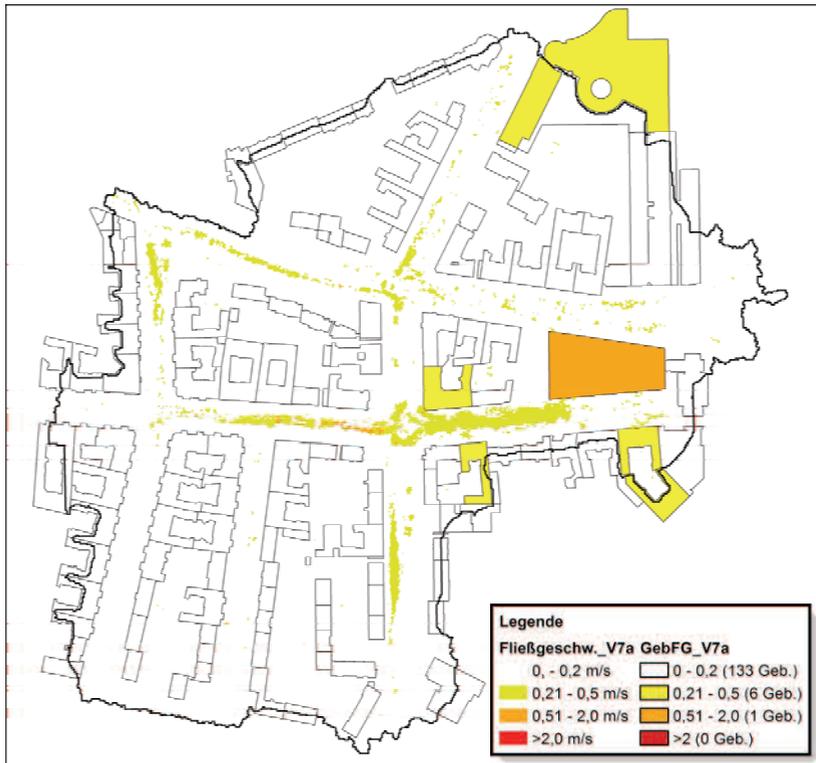
## A.1.32 Variante 6b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



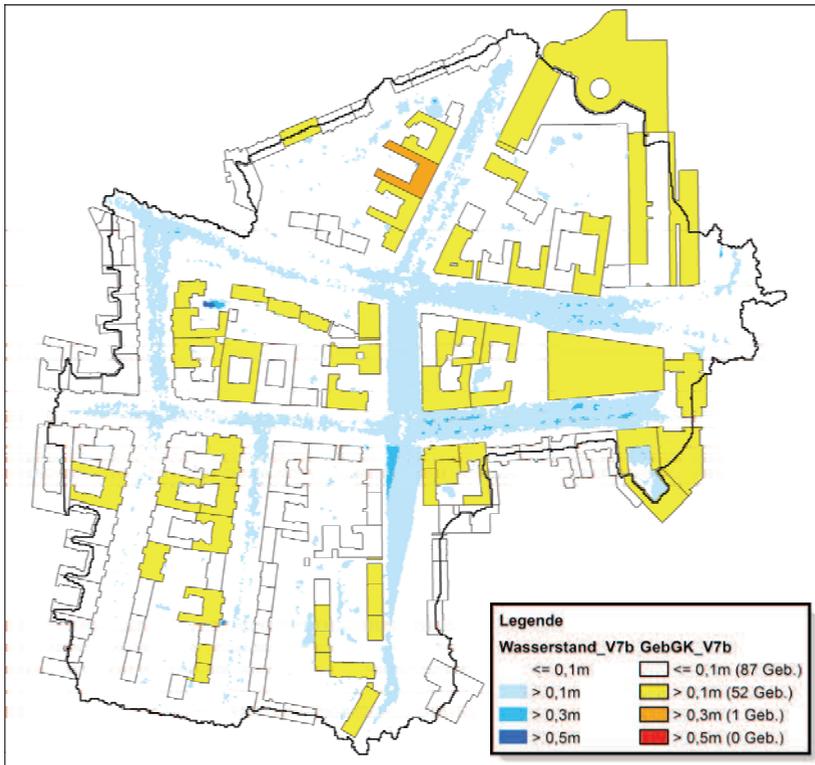
A.1.33 Variante 7a – Gefährdungskarte Wasserstand



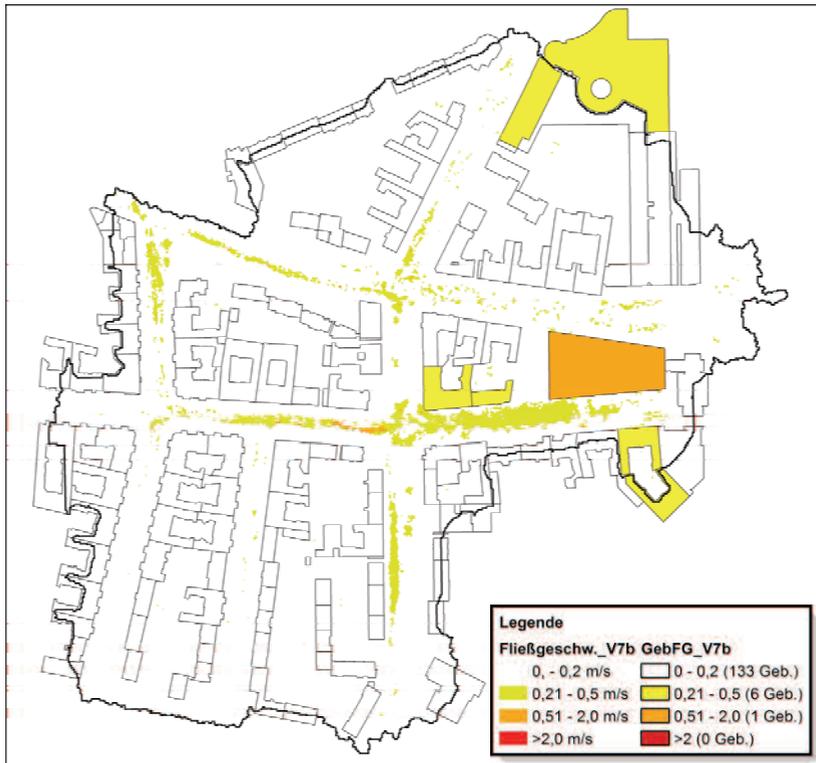
## A.1.34 Variante 7a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



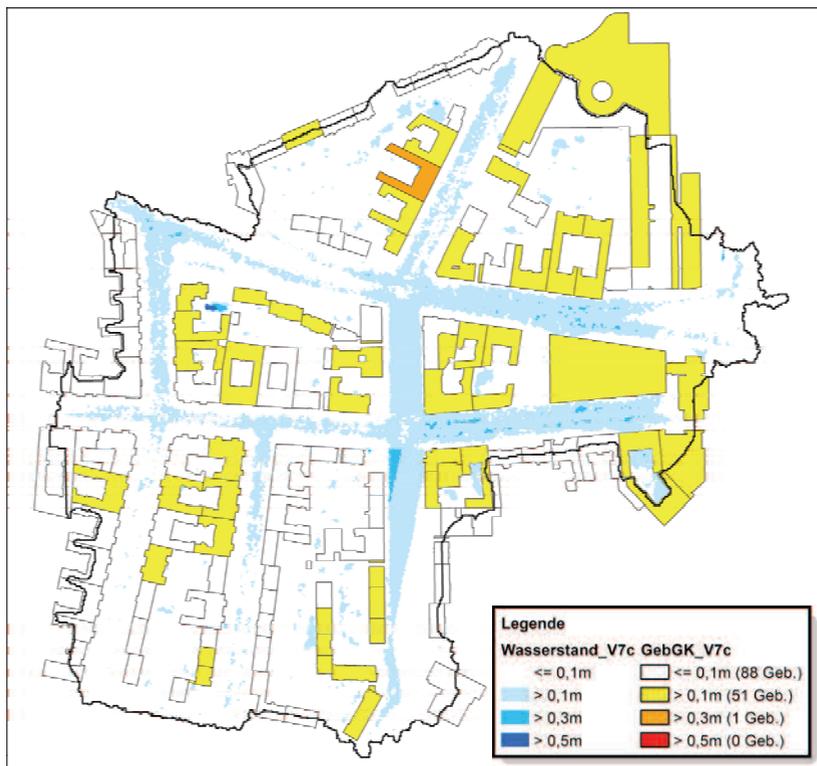
A.1.35 Variante 7b – Gefährdungskarte Wasserstand



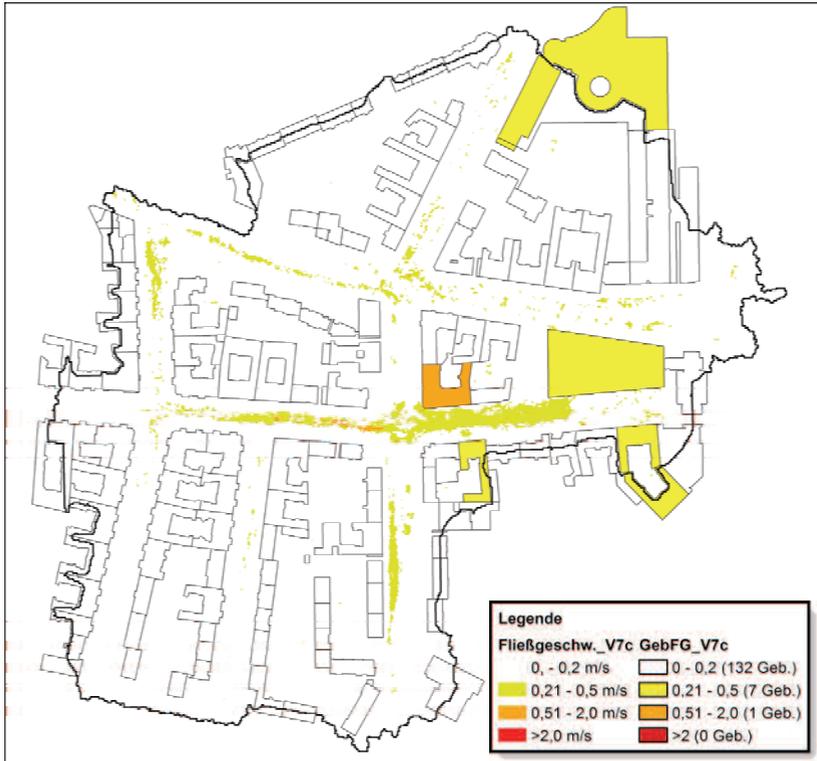
## A.1.36 Variante 7b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



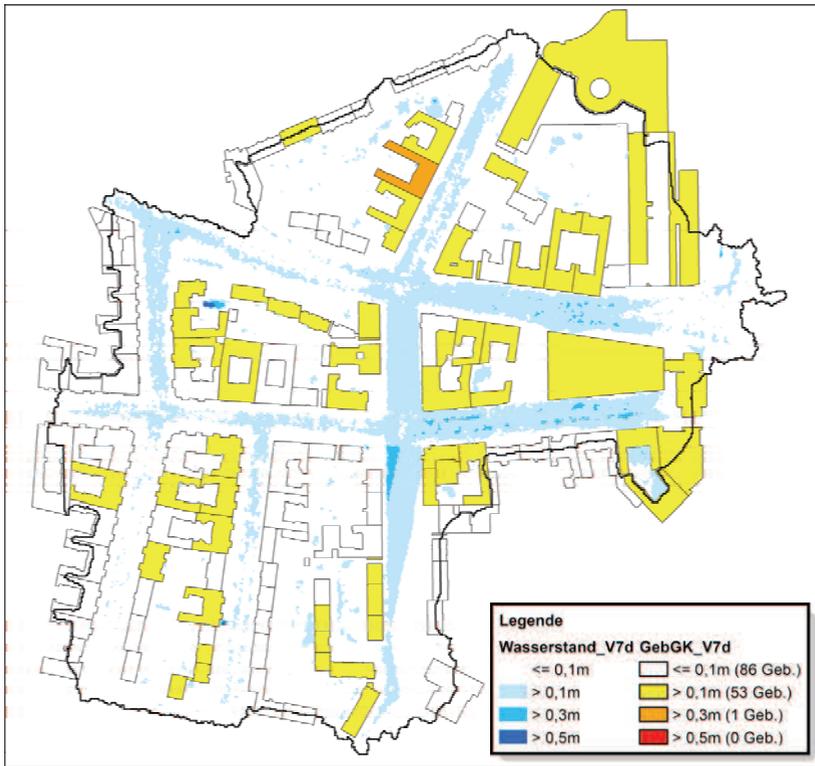
### A.1.37 Variante 7c – Gefährdungskarte Wasserstand



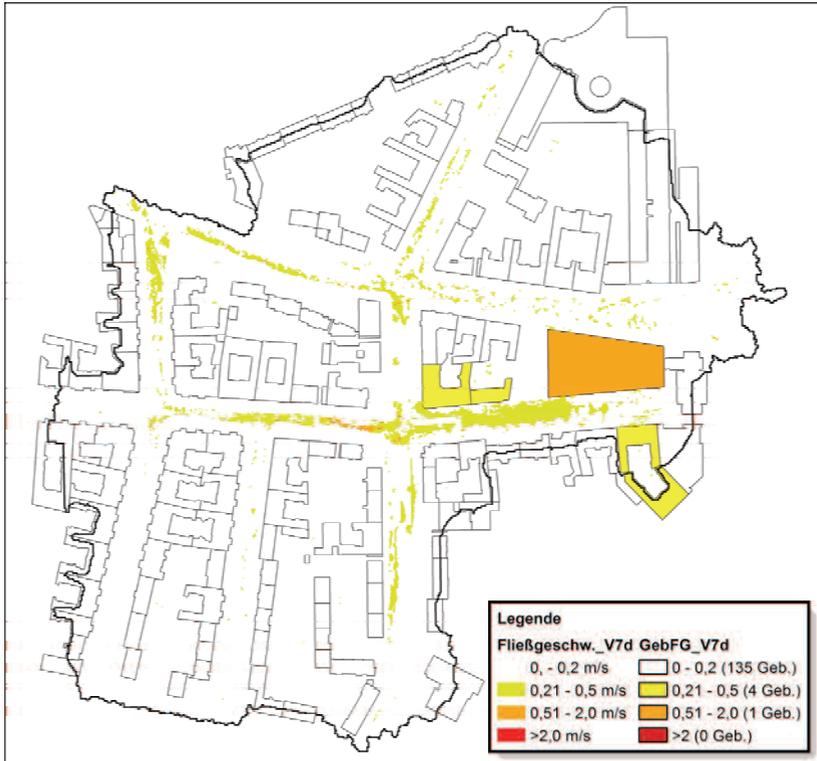
## A.1.38 Variante 7c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



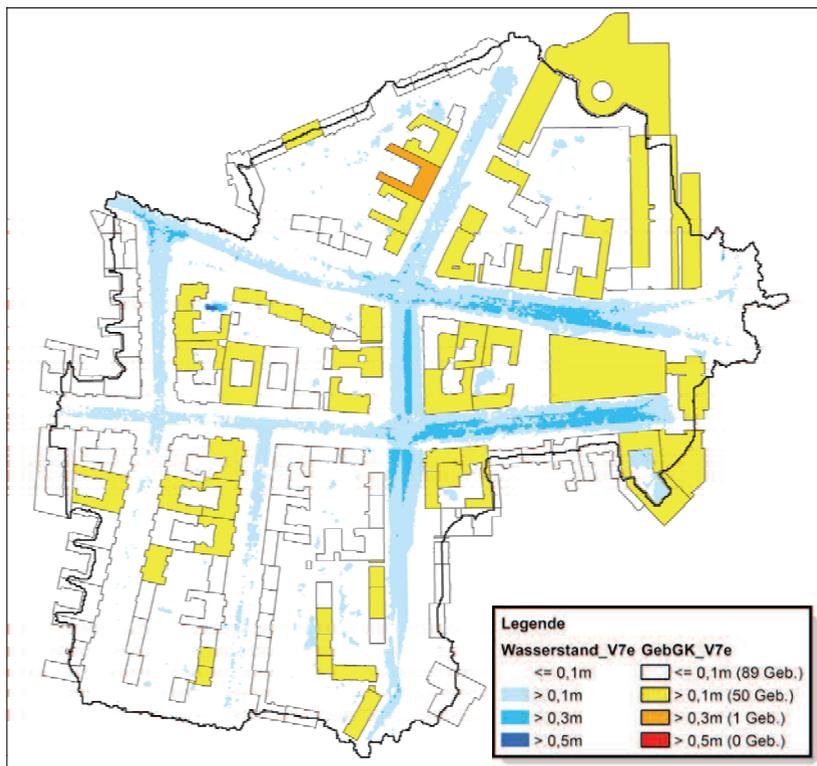
### A.1.39 Variante 7d – Gefährdungskarte Wasserstand



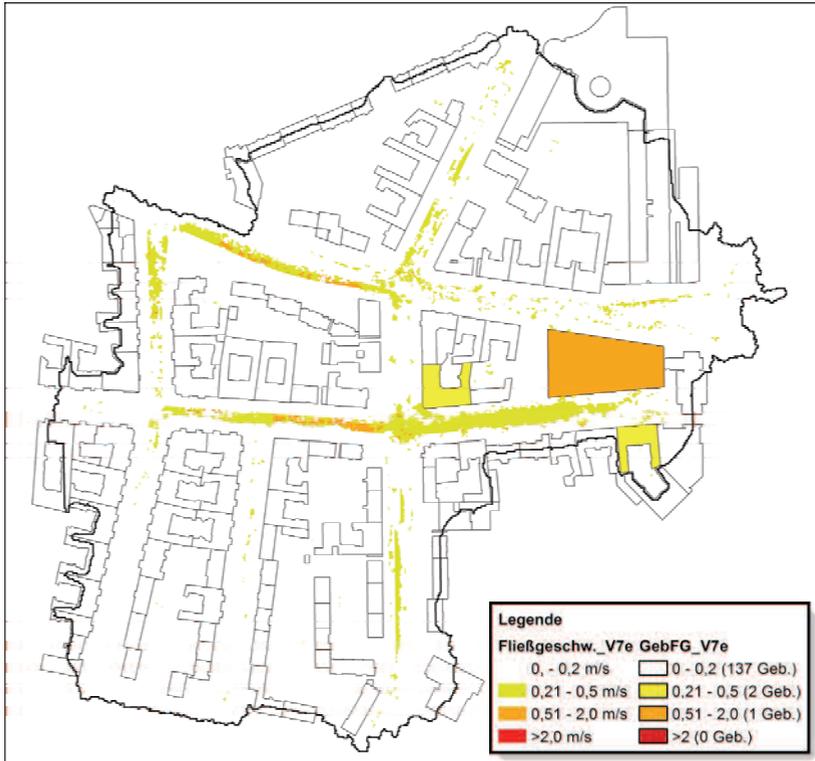
## A.1.40 Variante 7d – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



### A.1.1.41 Variante 7e – Gefährdungskarte Wasserstand

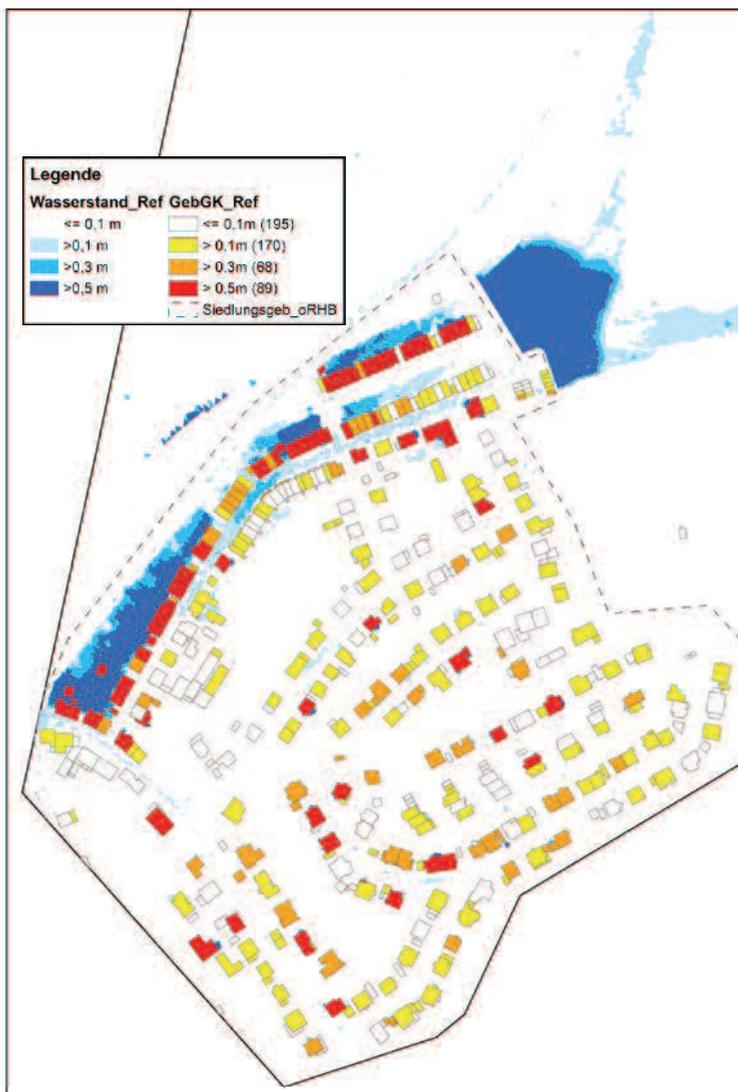


## A.1.42 Variante 7e – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit

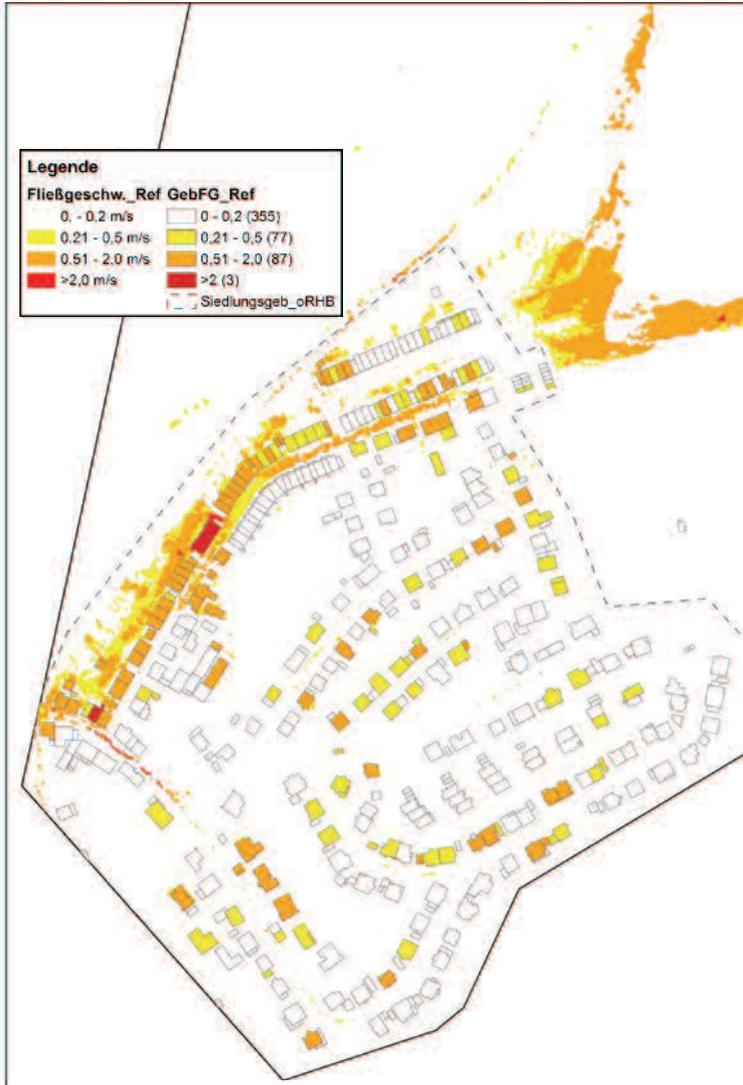


## Anhang A 2 Gefährdungskarten Modellgebiet 2

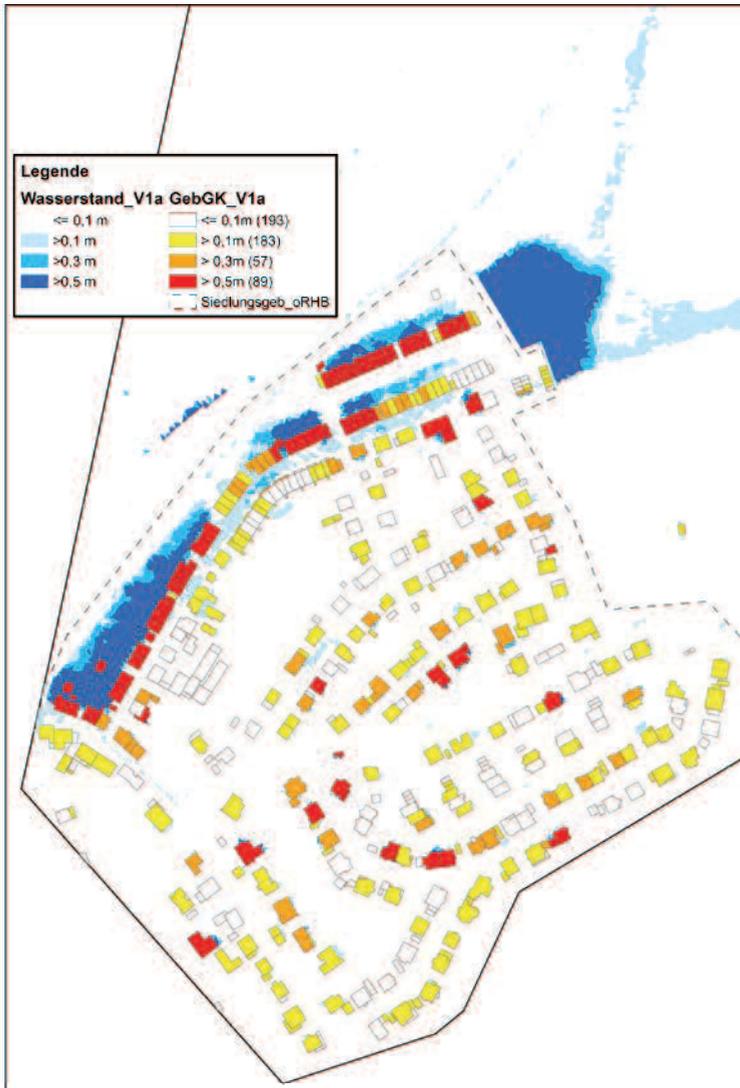
### A.2.1 Referenzmodell – Gefährdungskarte Wasserstand



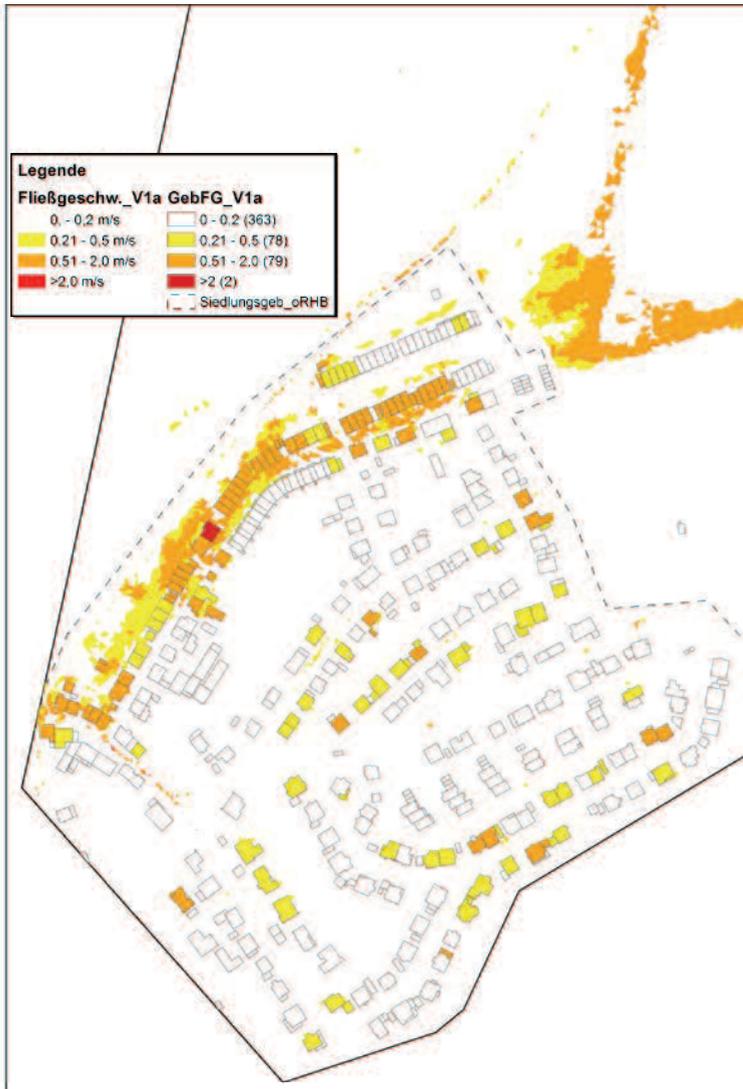
## A.2.2 Referenzmodell – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



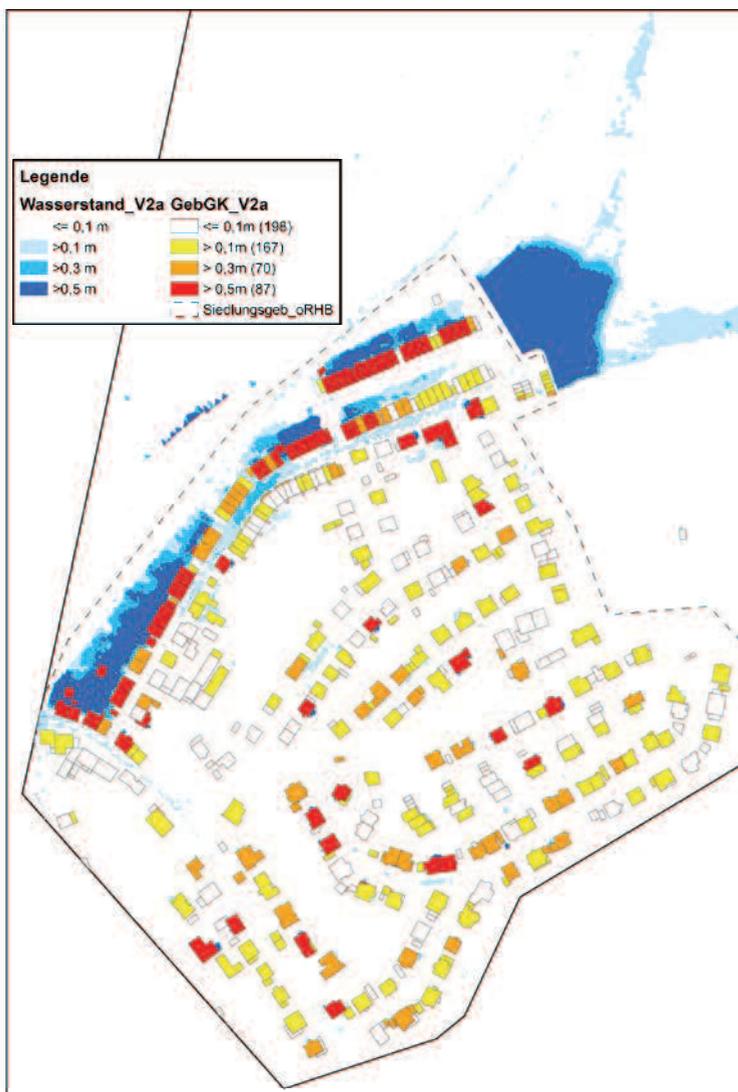
### A.2.3 Variante 1a – Gefährdungskarte Wasserstand



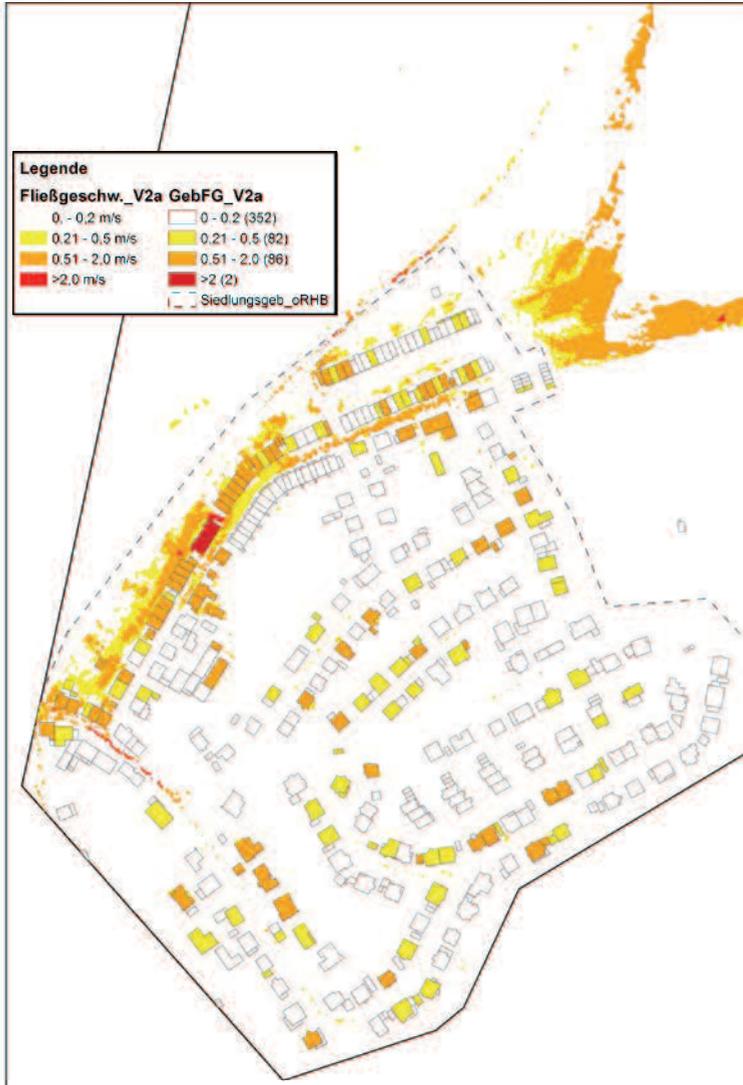
## A.2.4 Variante 1a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



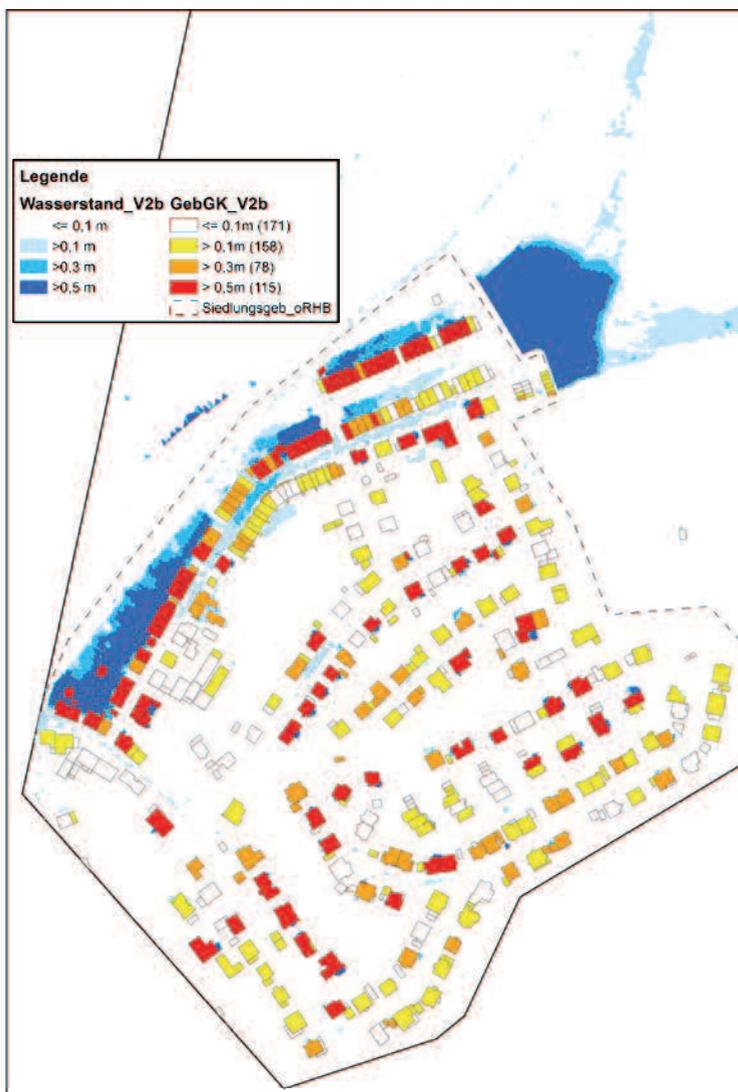
### A.2.5 Variante 2a – Gefährdungskarte Wasserstand



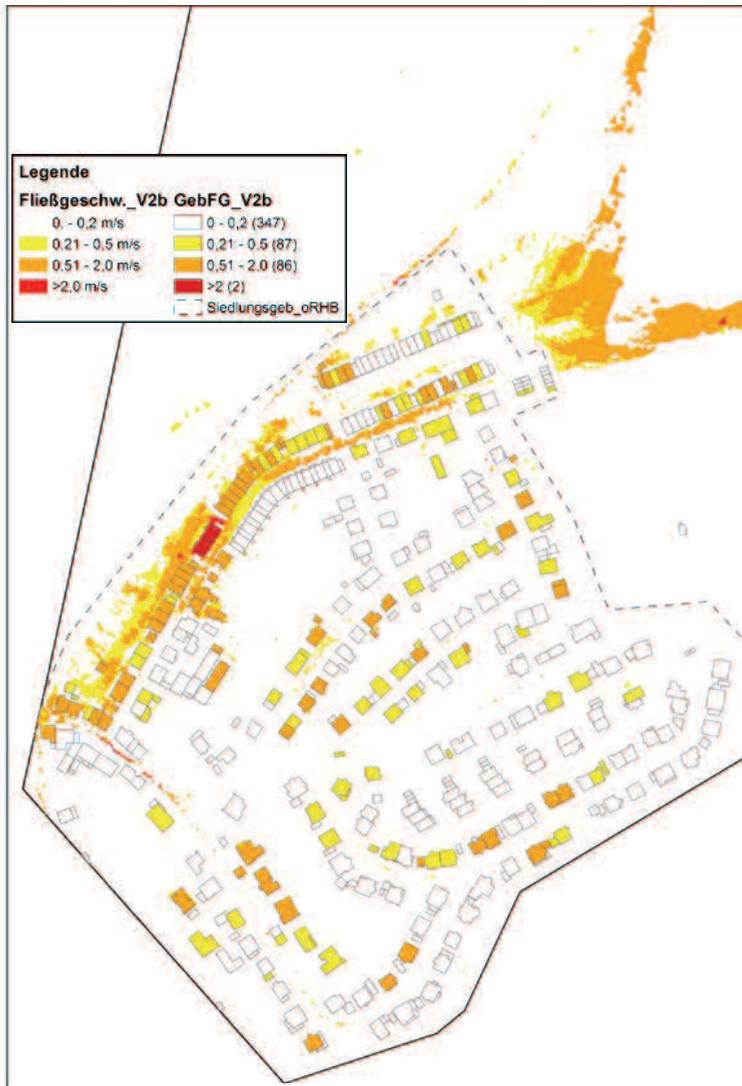
## A.2.6 Variante 2a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



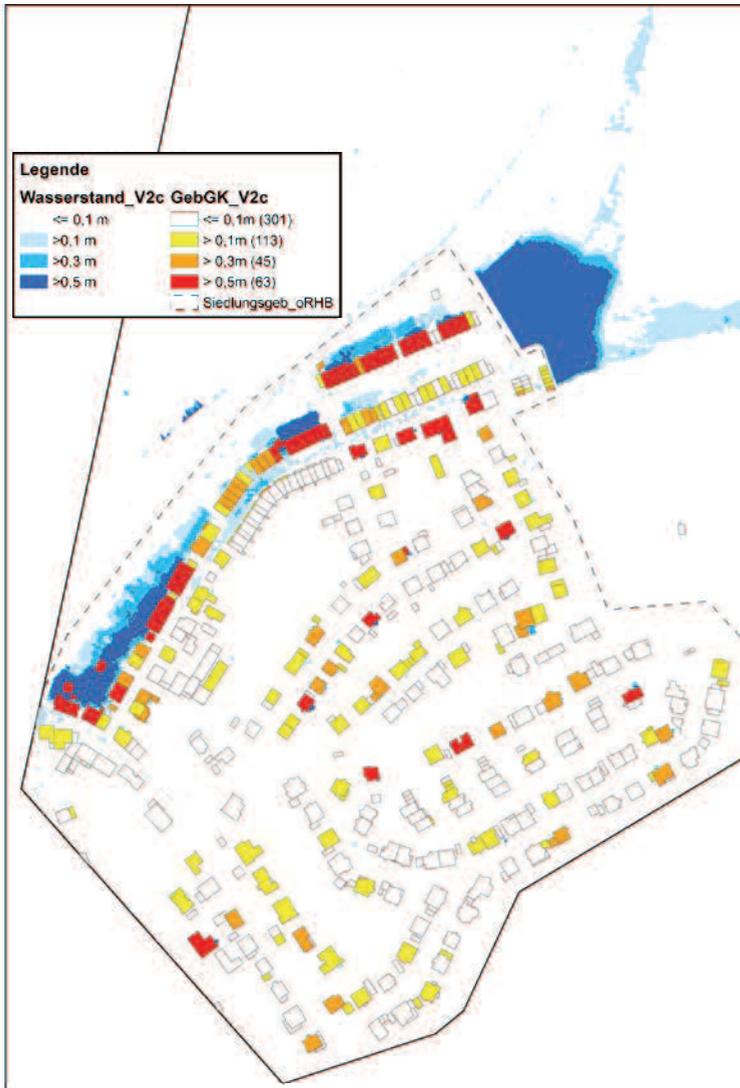
### A.2.7 Variante 2b – Gefährdungskarte Wasserstand



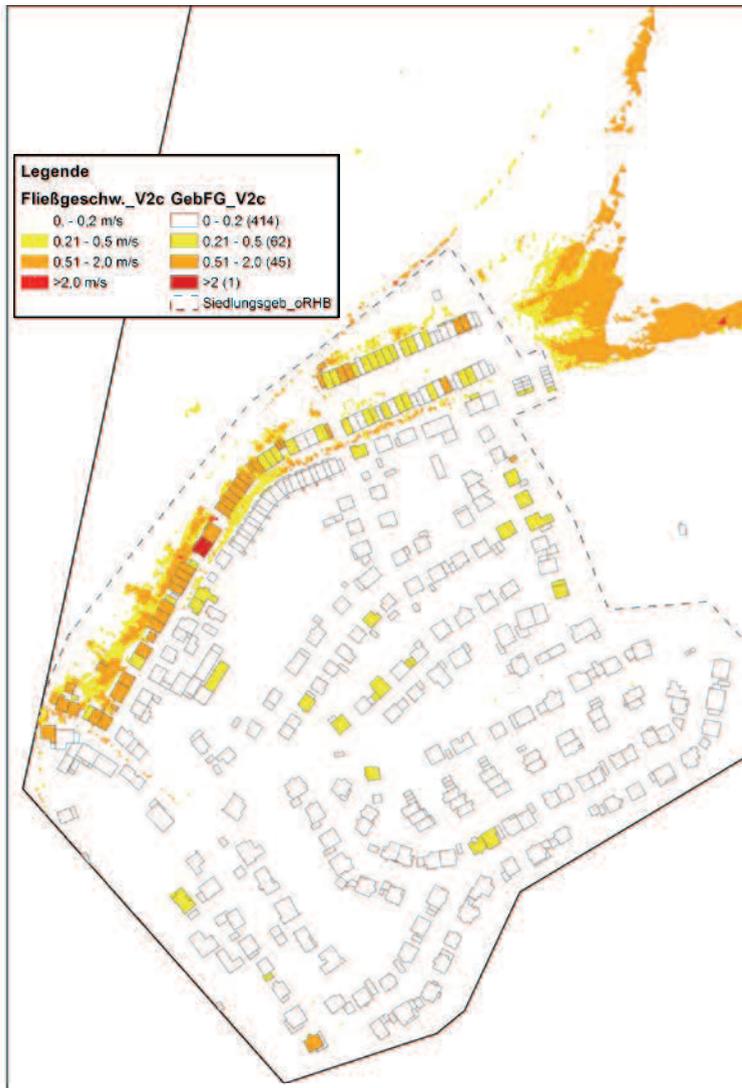
## A.2.8 Variante 2b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



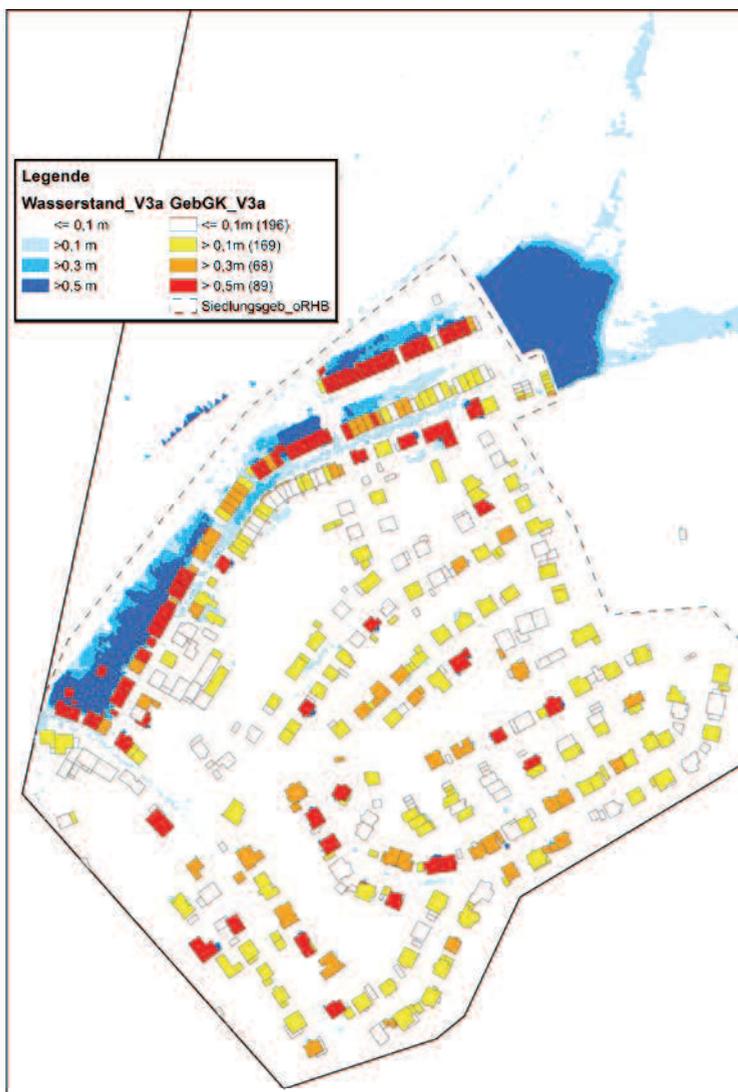
### A.2.9 Variante 2c – Gefährdungskarte Wasserstand



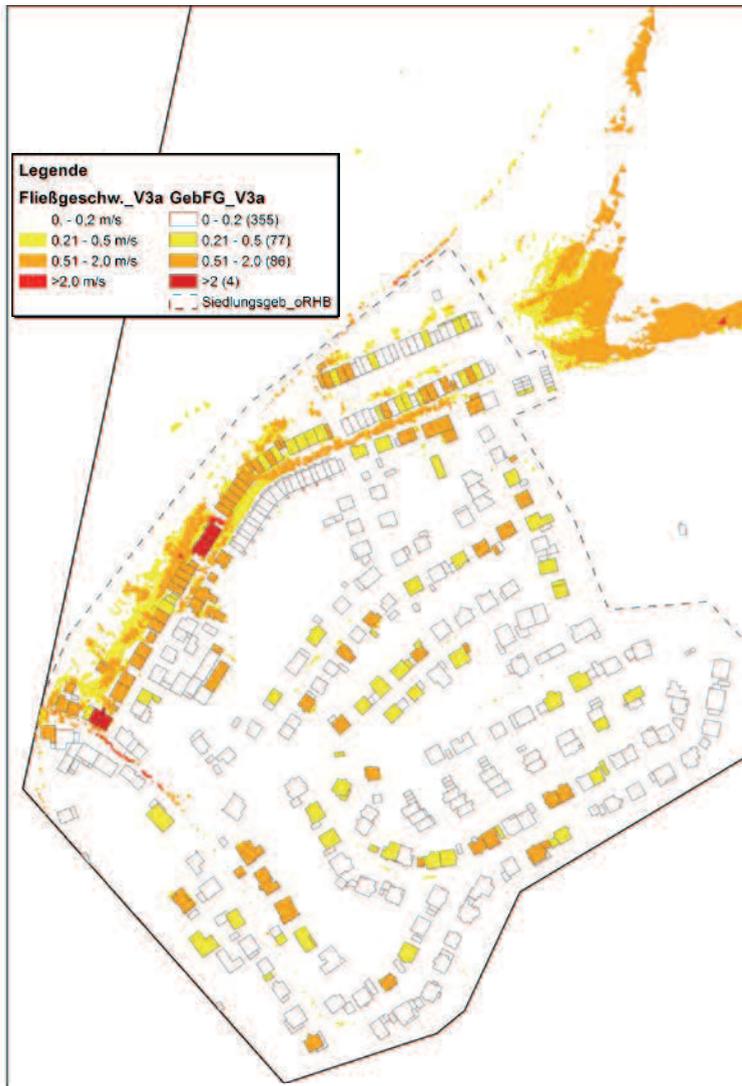
## A.2.10 Variante 2c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



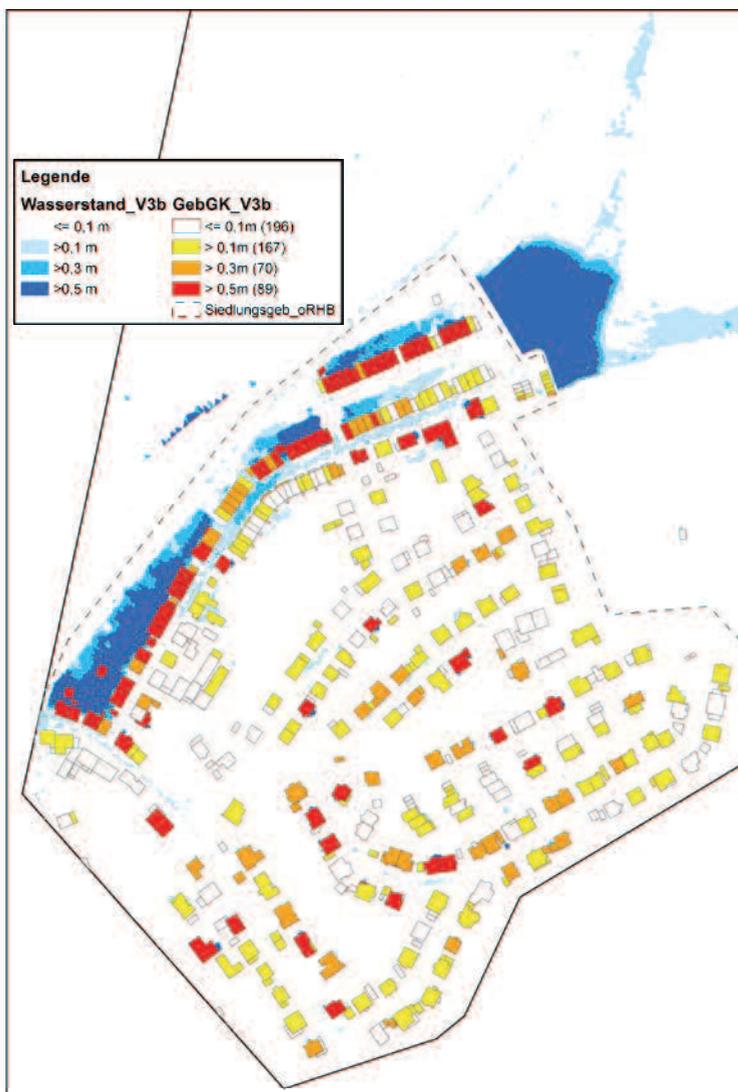
### A.2.11 Variante 3a – Gefährdungskarte Wasserstand



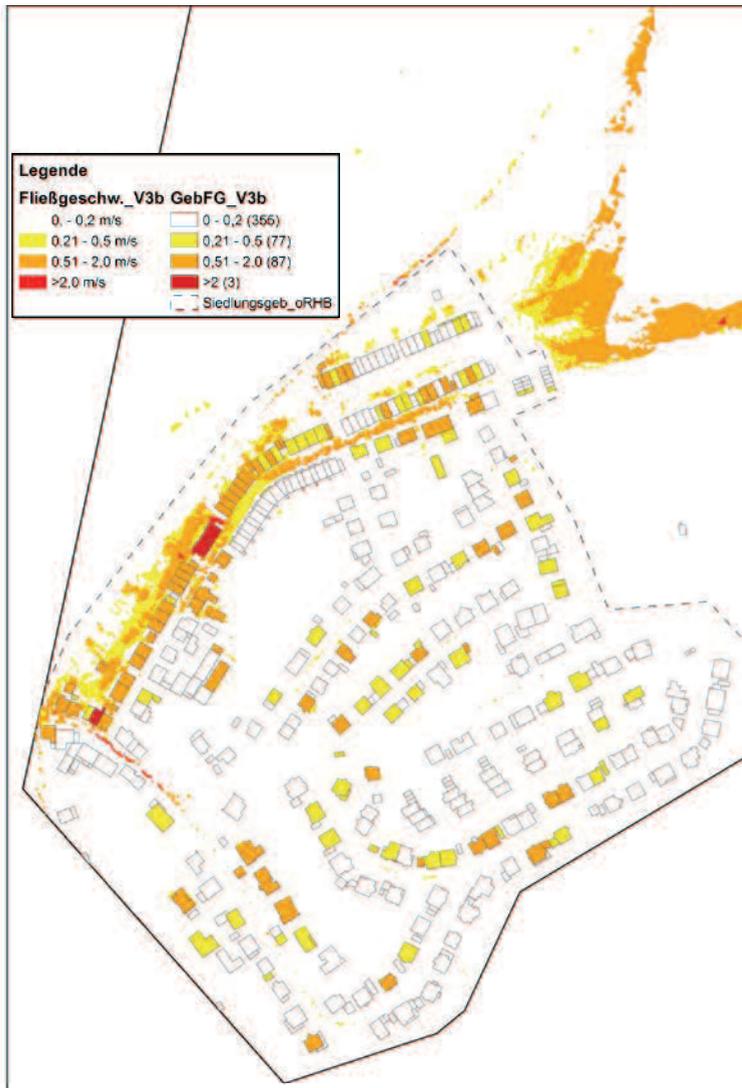
## A.2.12 Variante 3a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



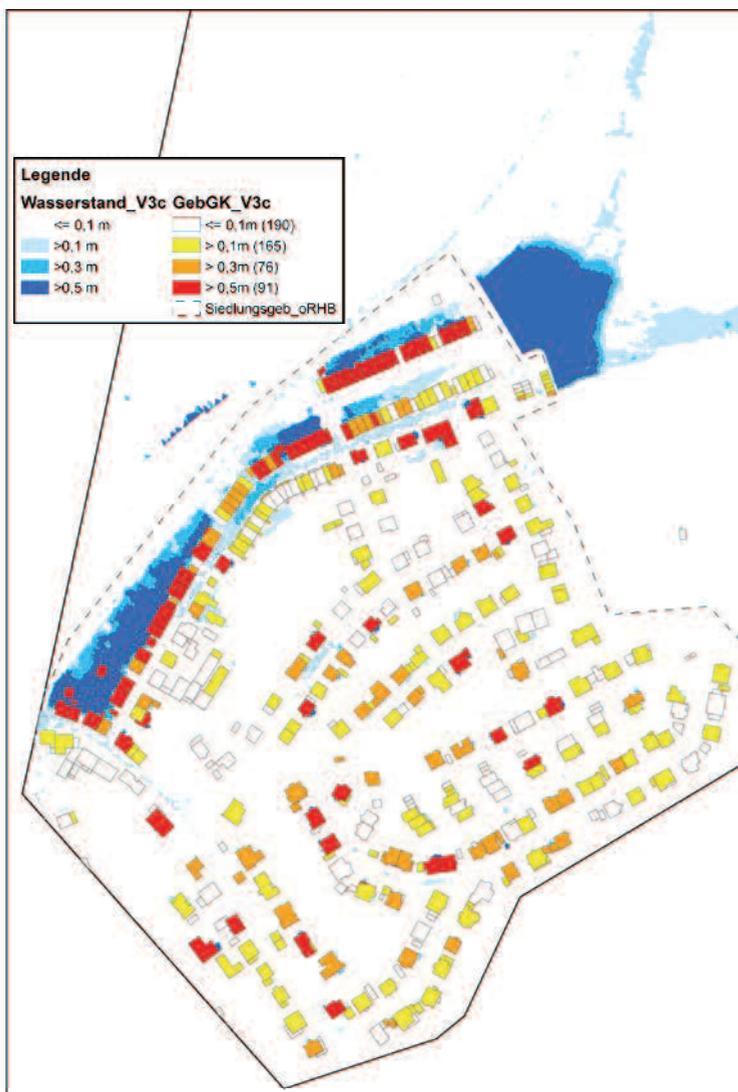
### A.2.13 Variante 3b – Gefährdungskarte Wasserstand



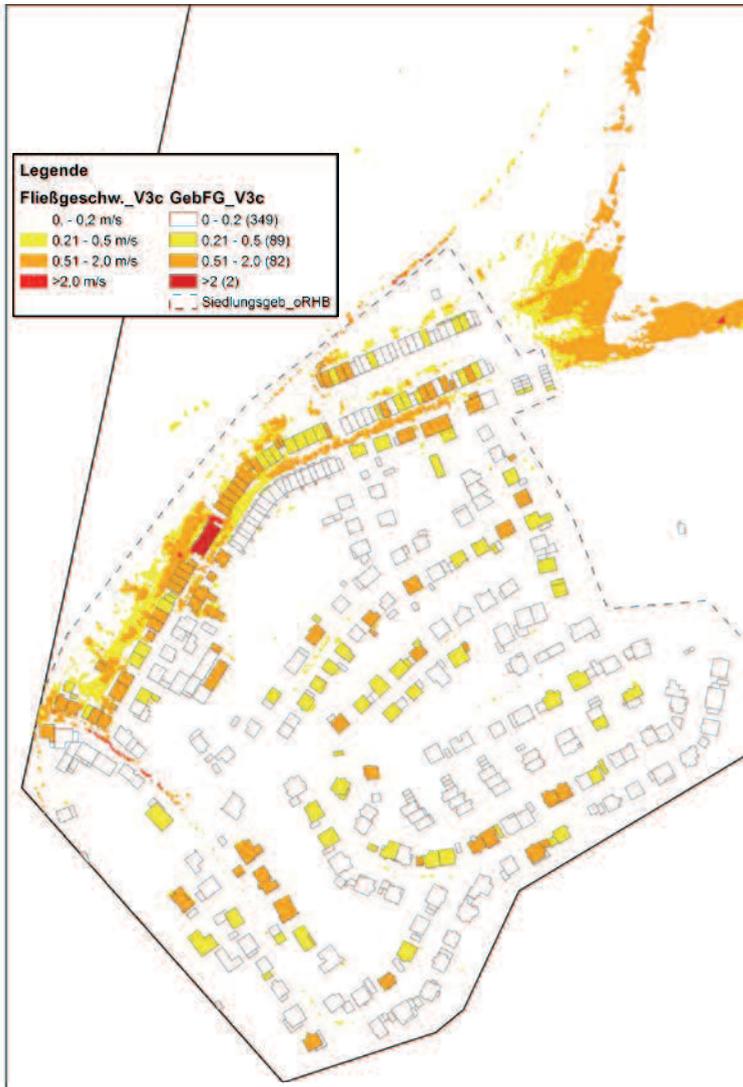
## A.2.14 Variante 3b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



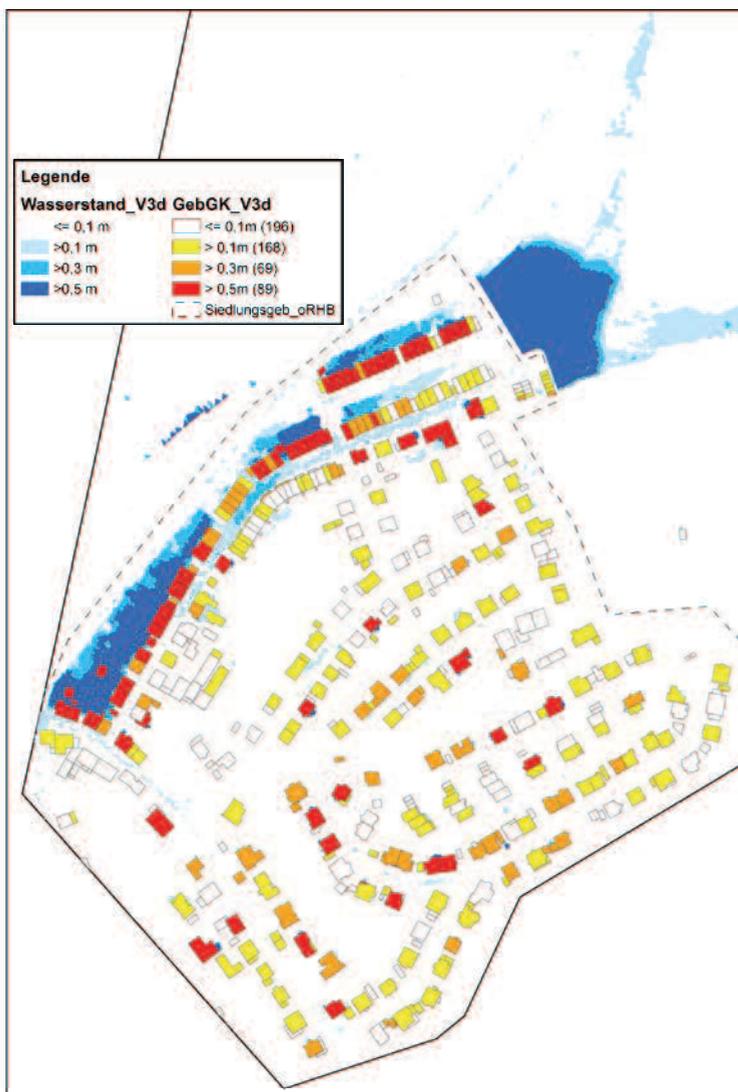
### A.2.15 Variante 3c – Gefährdungskarte Wasserstand



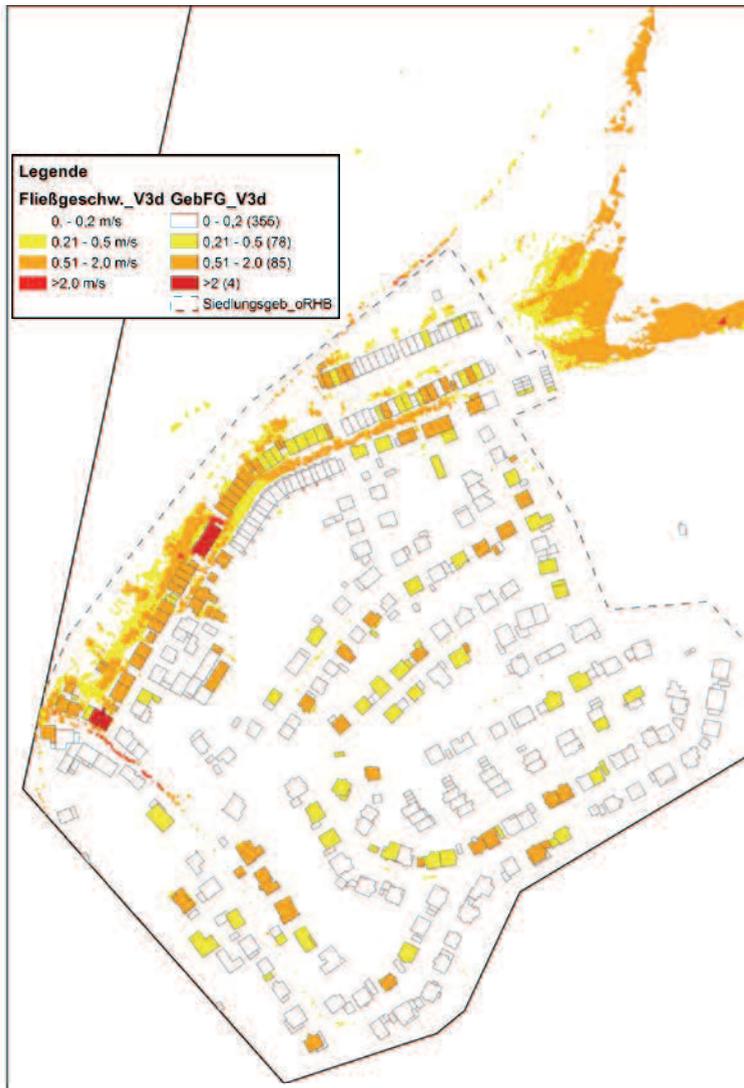
## A.2.16 Variante 3c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



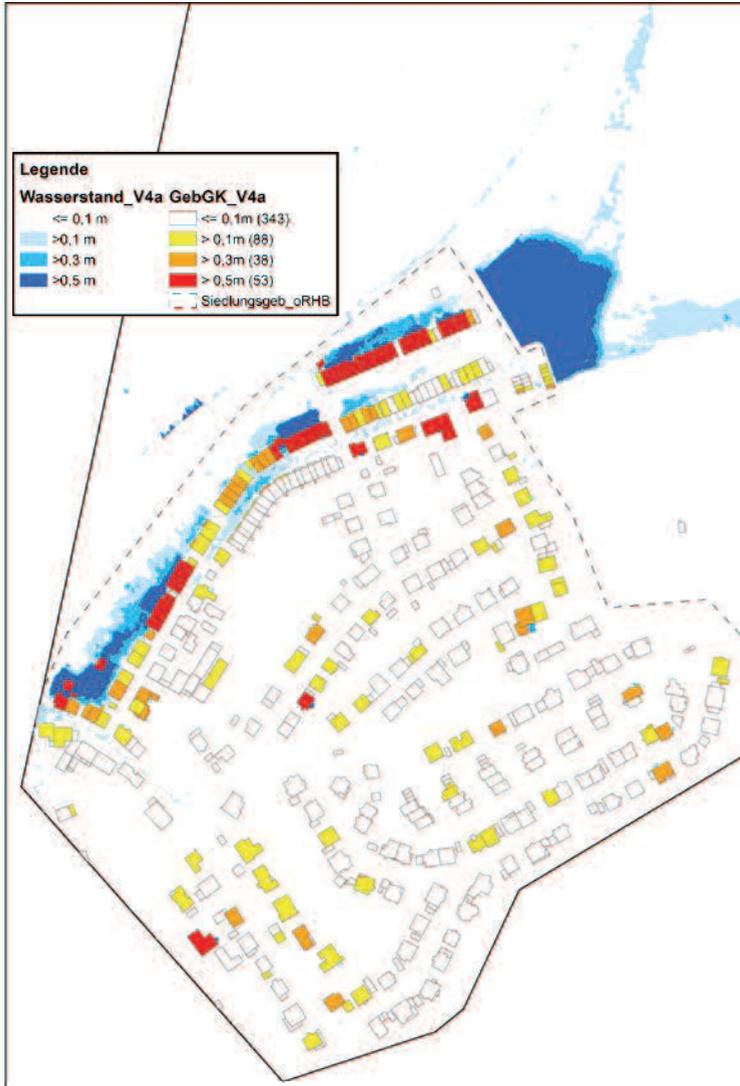
### A.2.17 Variante 3d – Gefährdungskarte Wasserstand



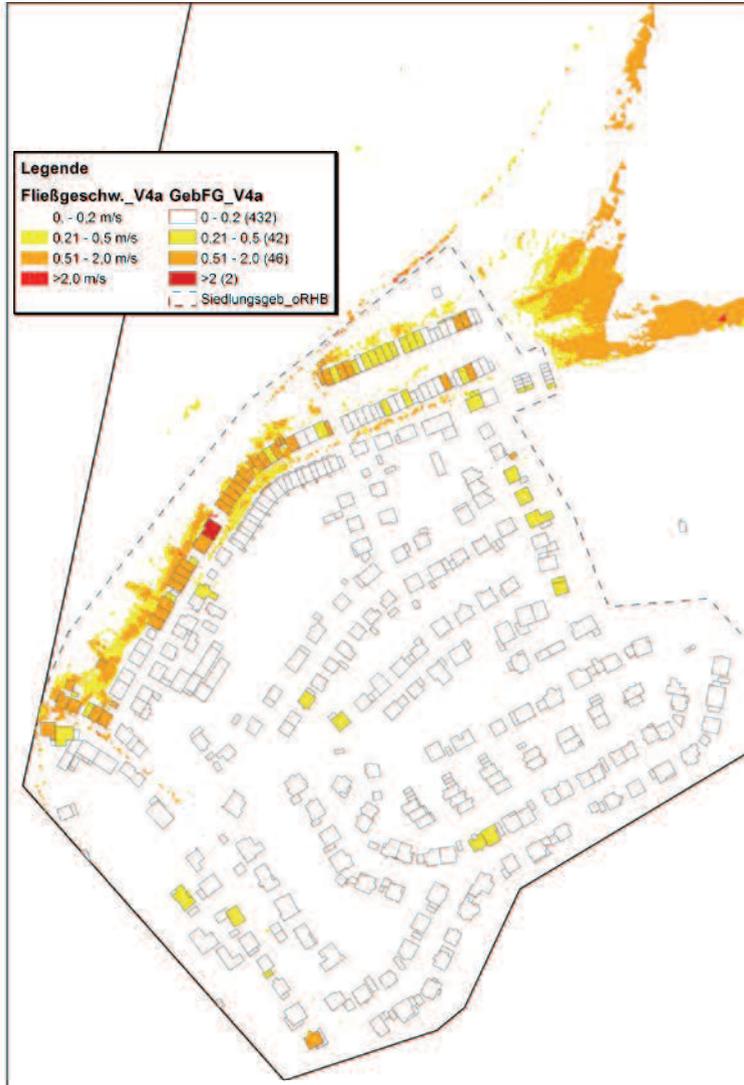
## A.2.18 Variante 3d – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



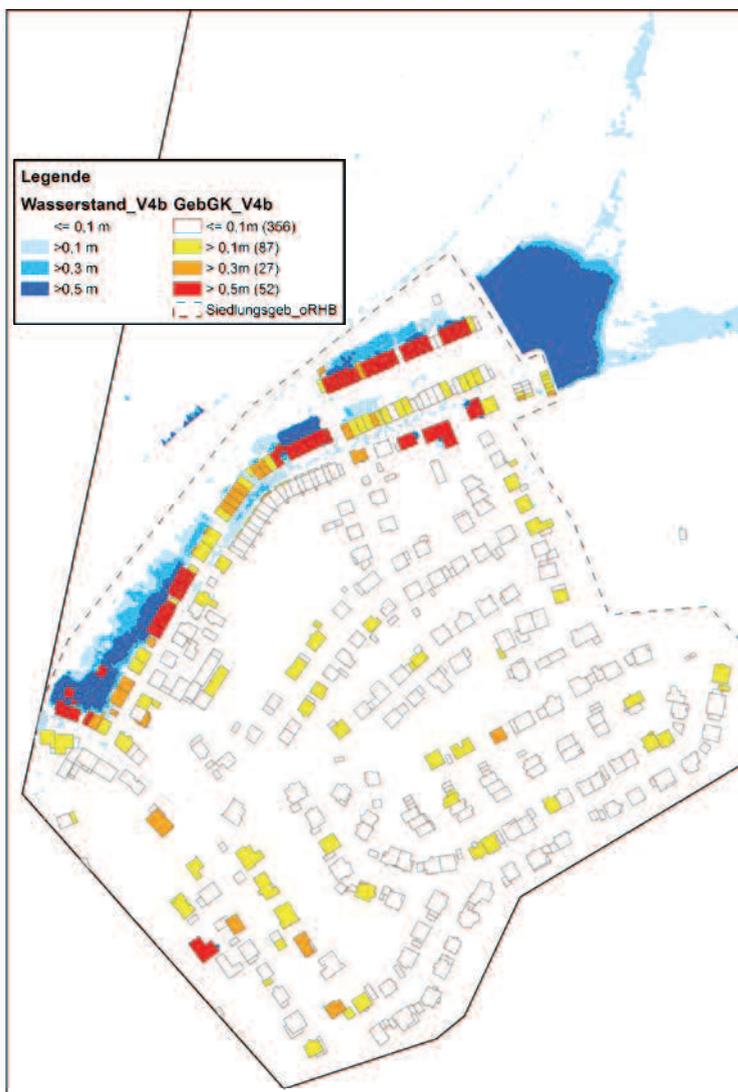
### A.2.19 Variante 4a – Gefährdungskarte Wasserstand



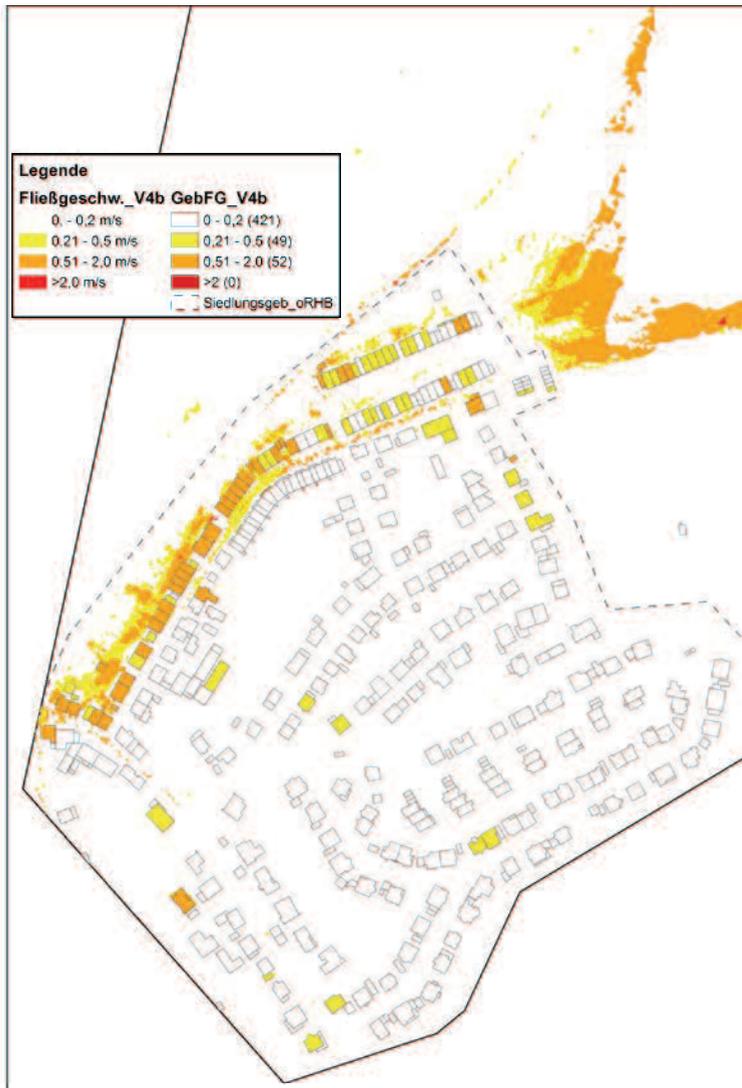
## A.2.20 Variante 4a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



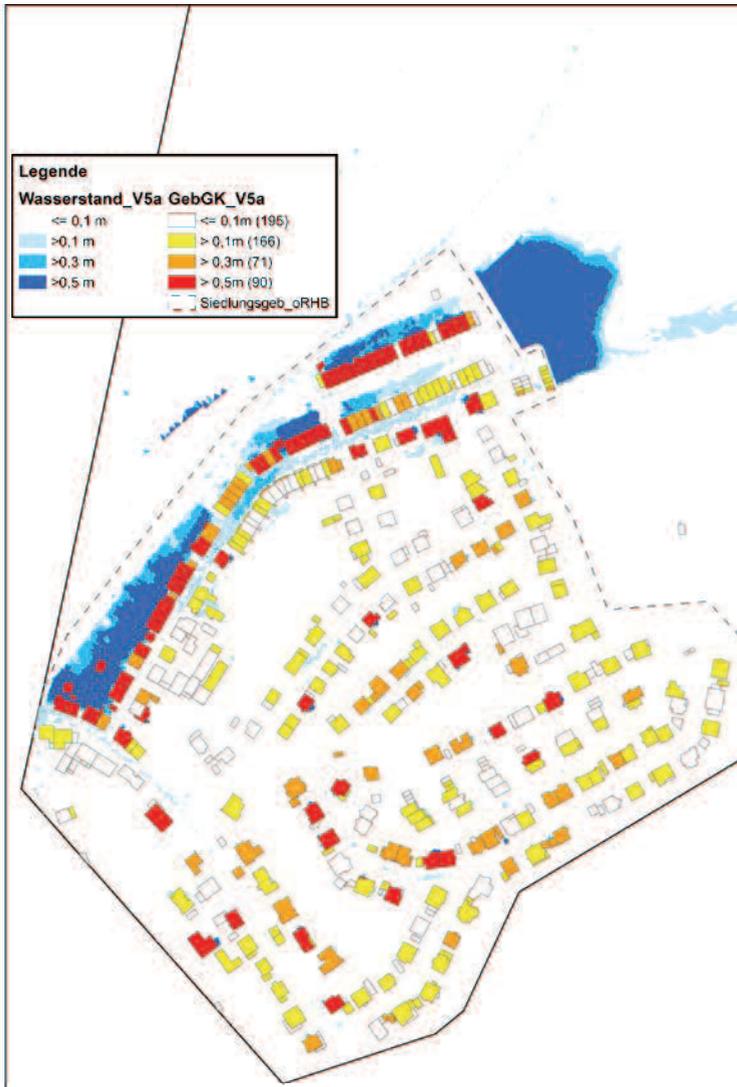
### A.2.21 Variante 4b – Gefährdungskarte Wasserstand



## A.2.22 Variante 4b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



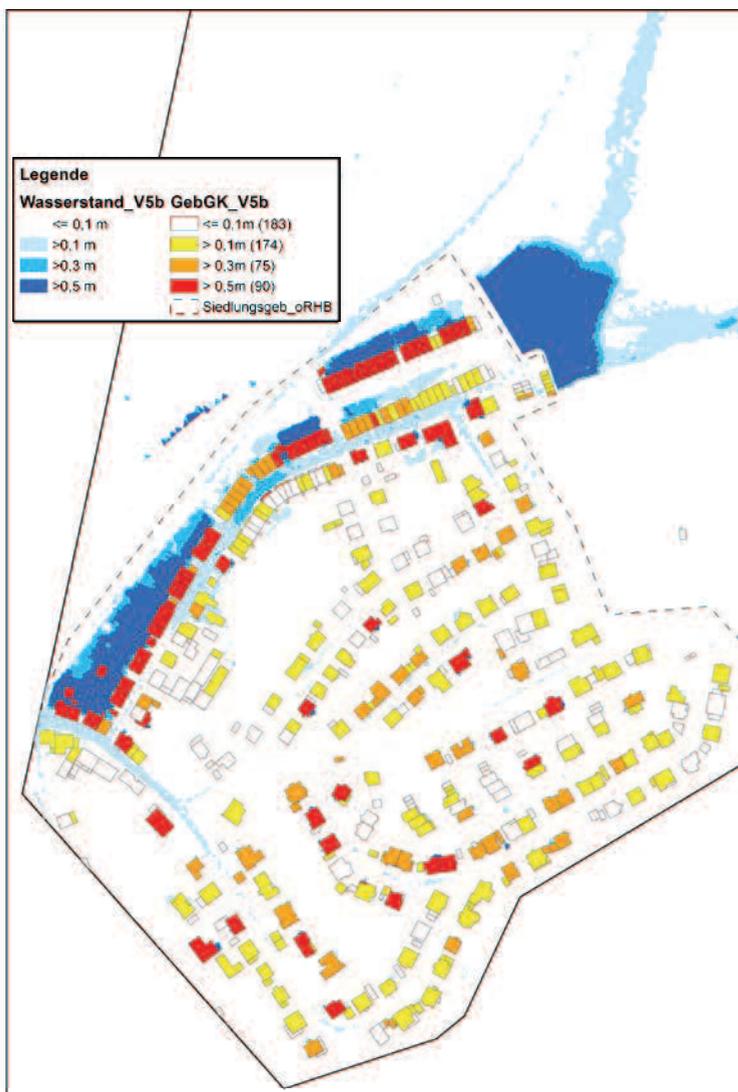
### A.2.23 Variante 5a – Gefährdungskarte Wasserstand



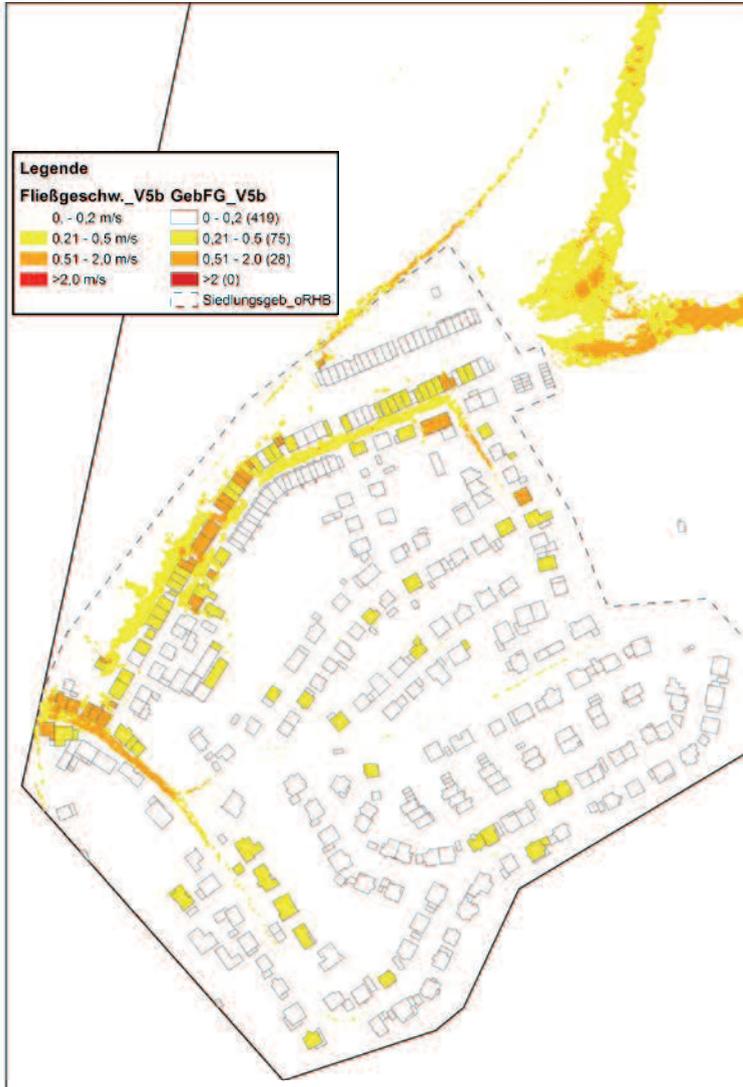
## A.2.24 Variante 5a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



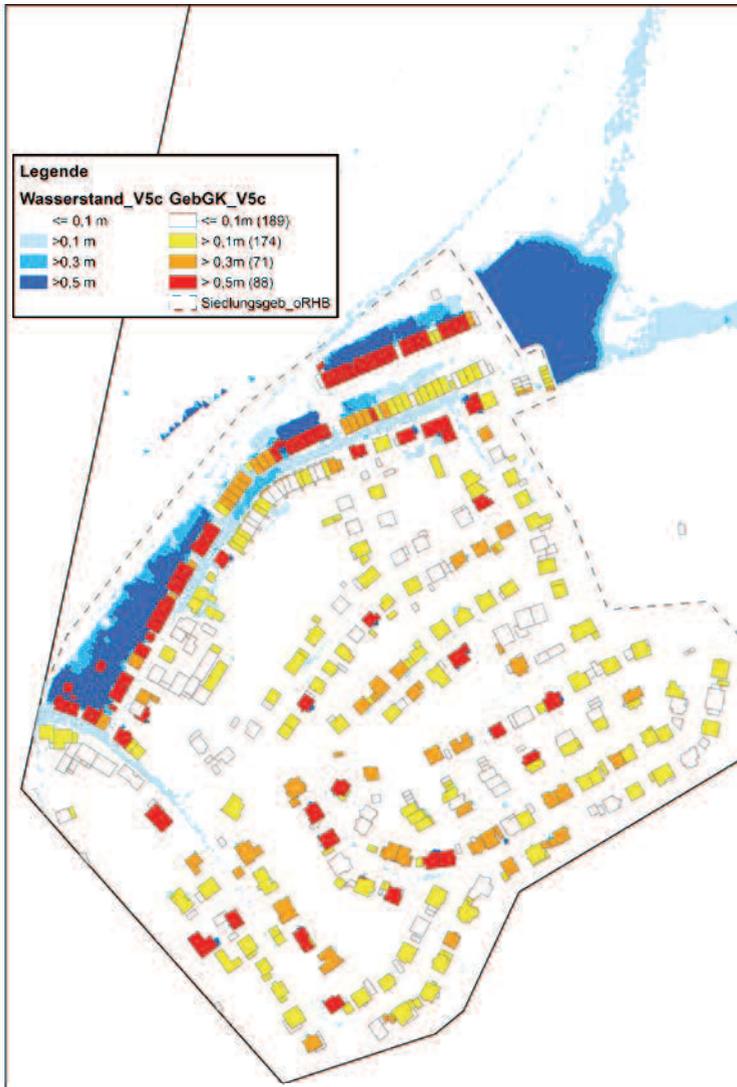
### A.2.25 Variante 5b – Gefährdungskarte Wasserstand



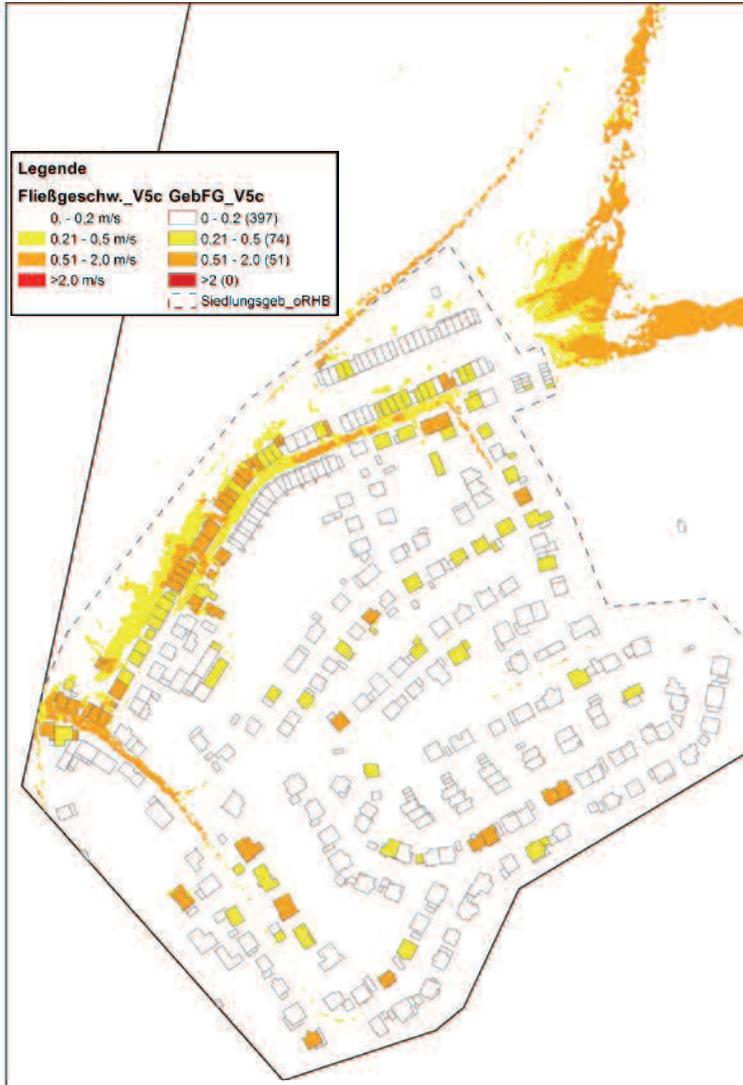
## A.2.26 Variante 5b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



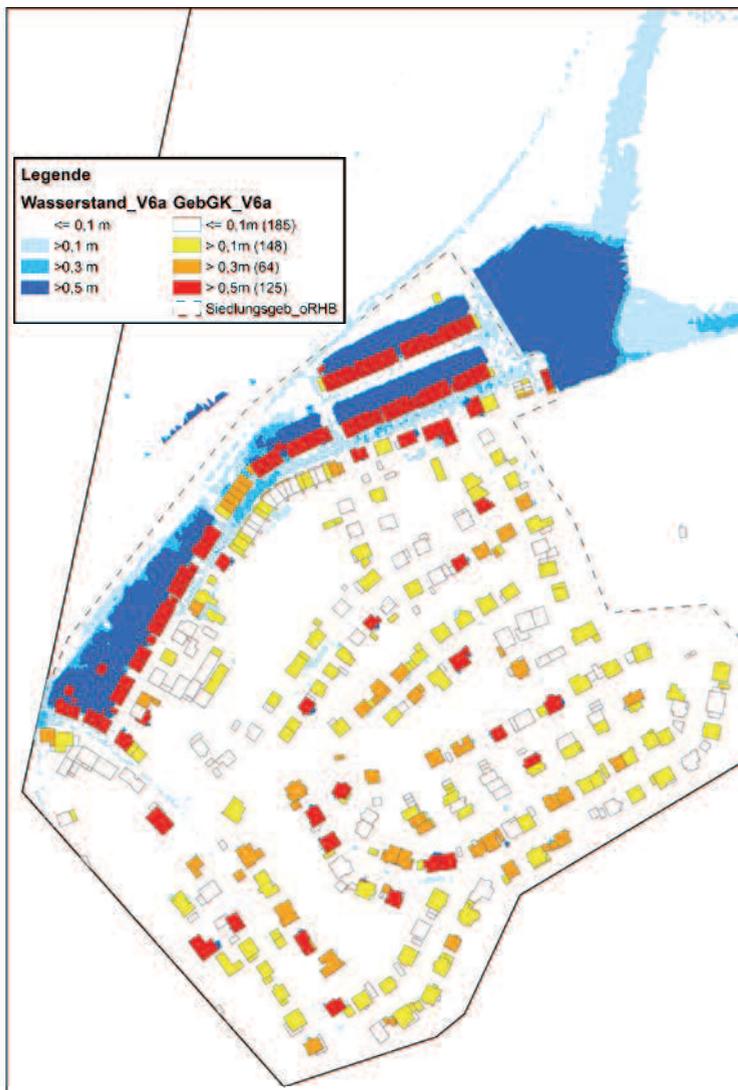
### A.2.27 Variante 5c – Gefährdungskarte Wasserstand



## A.2.28 Variante 5c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



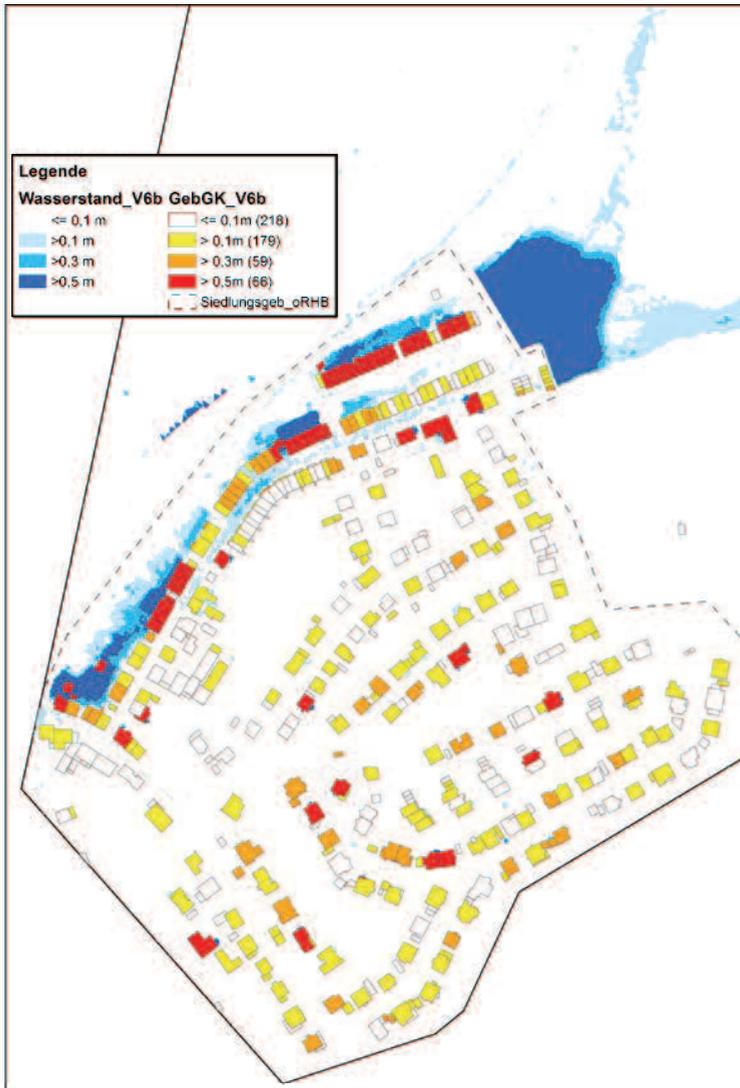
### A.2.29 Variante 6a – Gefährdungskarte Wasserstand



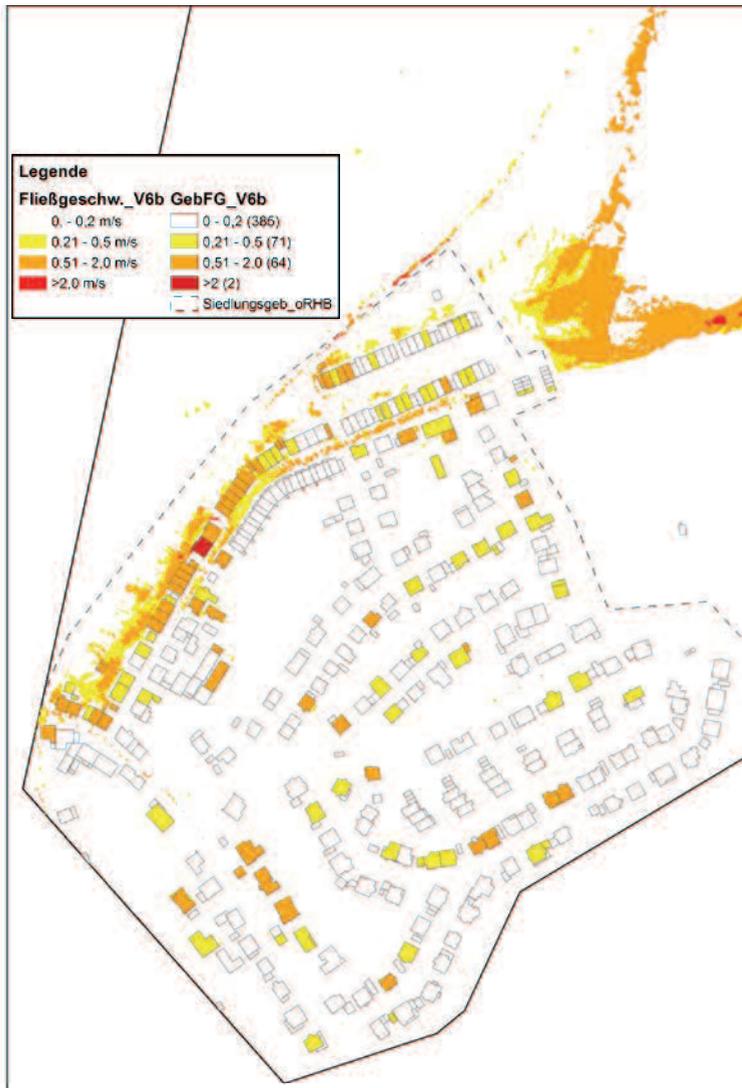
## A.2.30 Variante 6a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



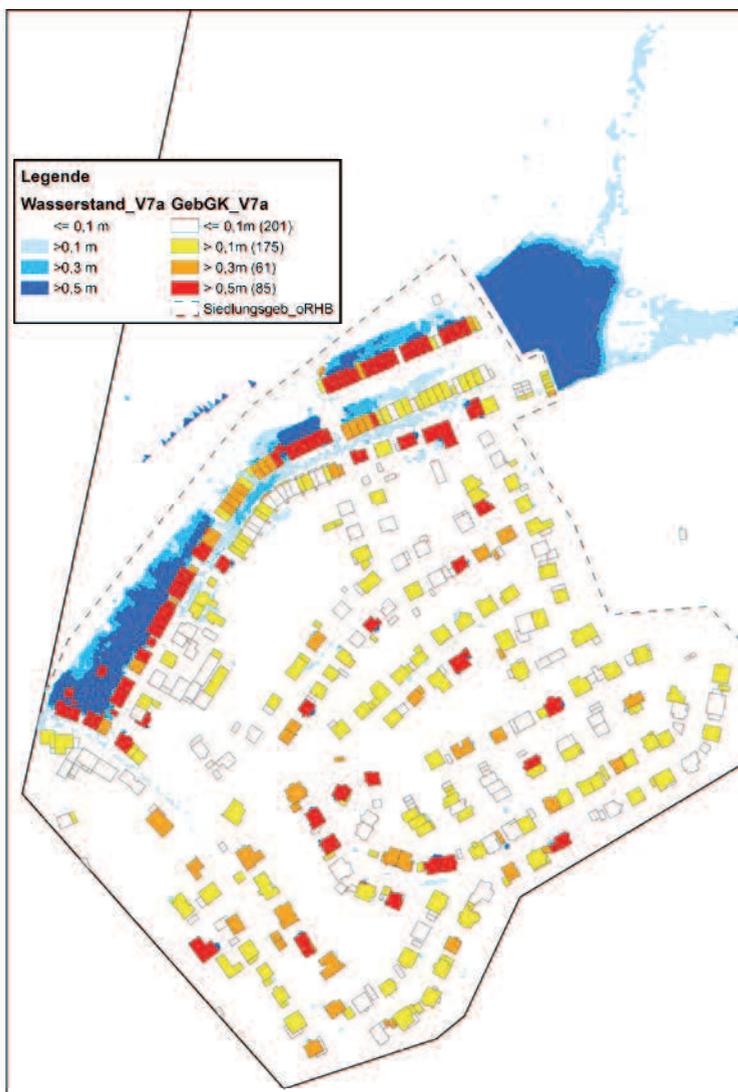
### A.2.31 Variante 6b – Gefährdungskarte Wasserstand



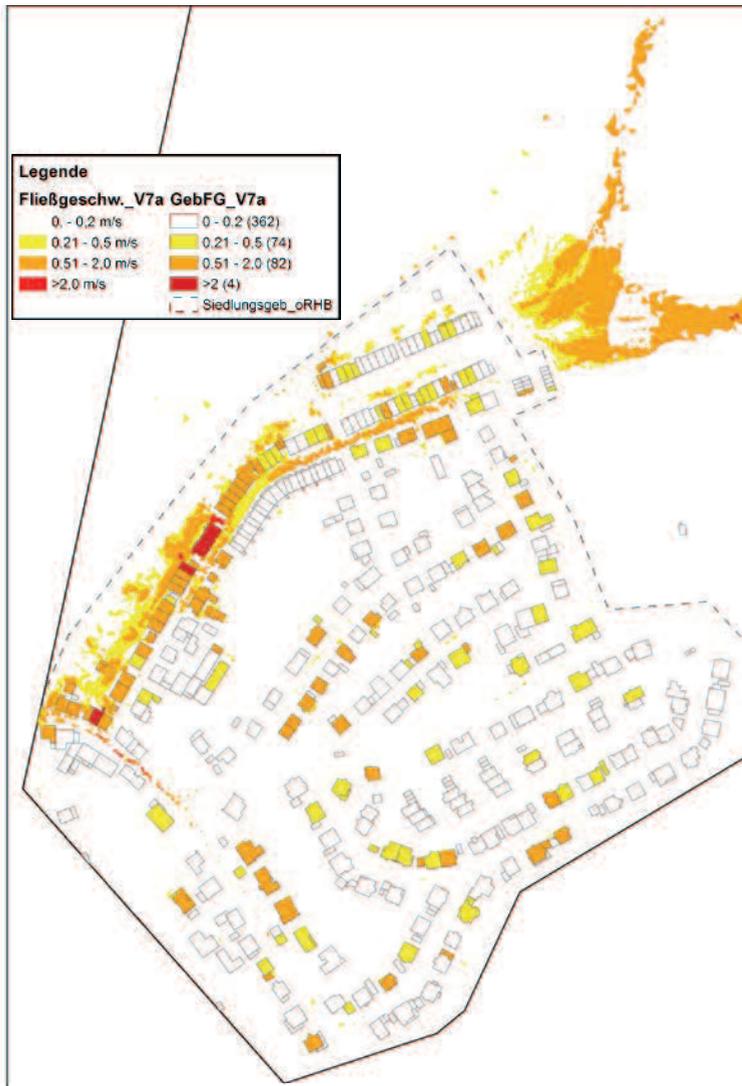
## A.2.32 Variante 6b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



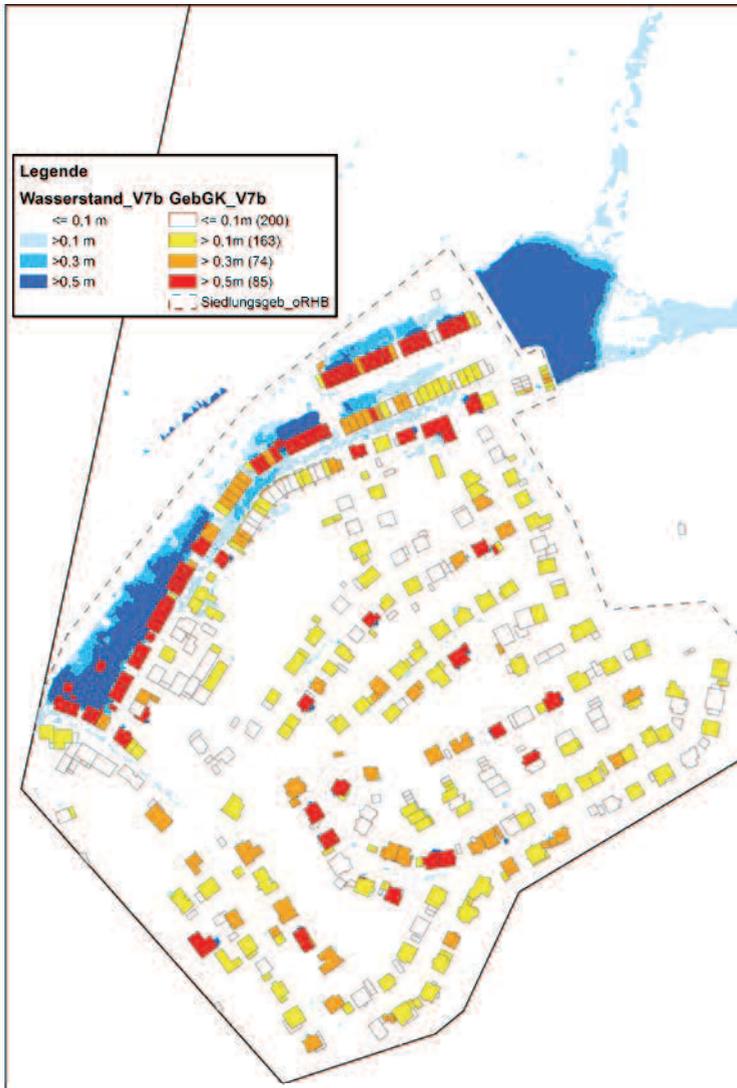
### A.2.33 Variante 7a – Gefährdungskarte Wasserstand



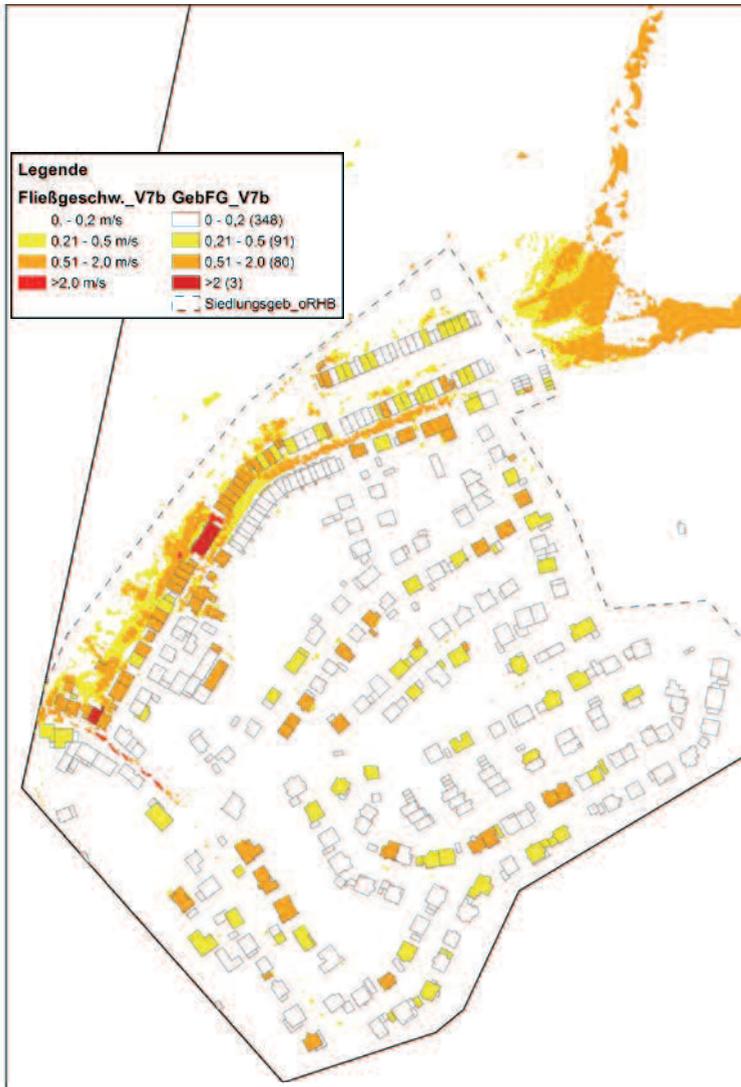
## A.2.34 Variante 7a – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



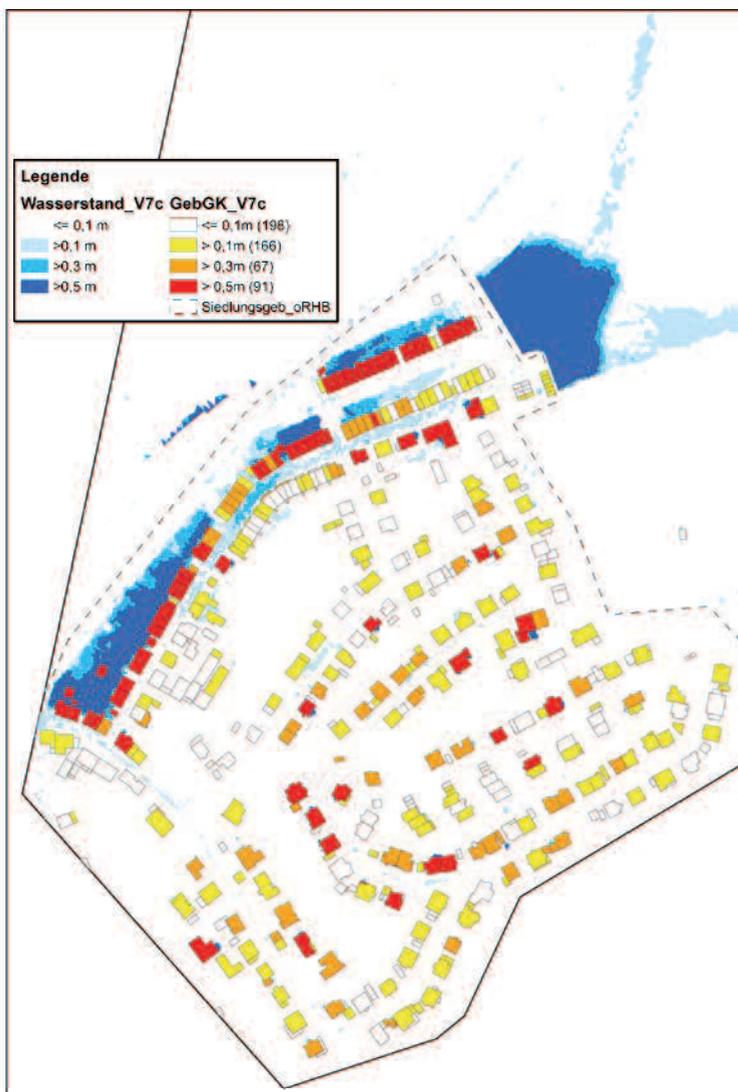
### A.2.35 Variante 7b – Gefährdungskarte Wasserstand



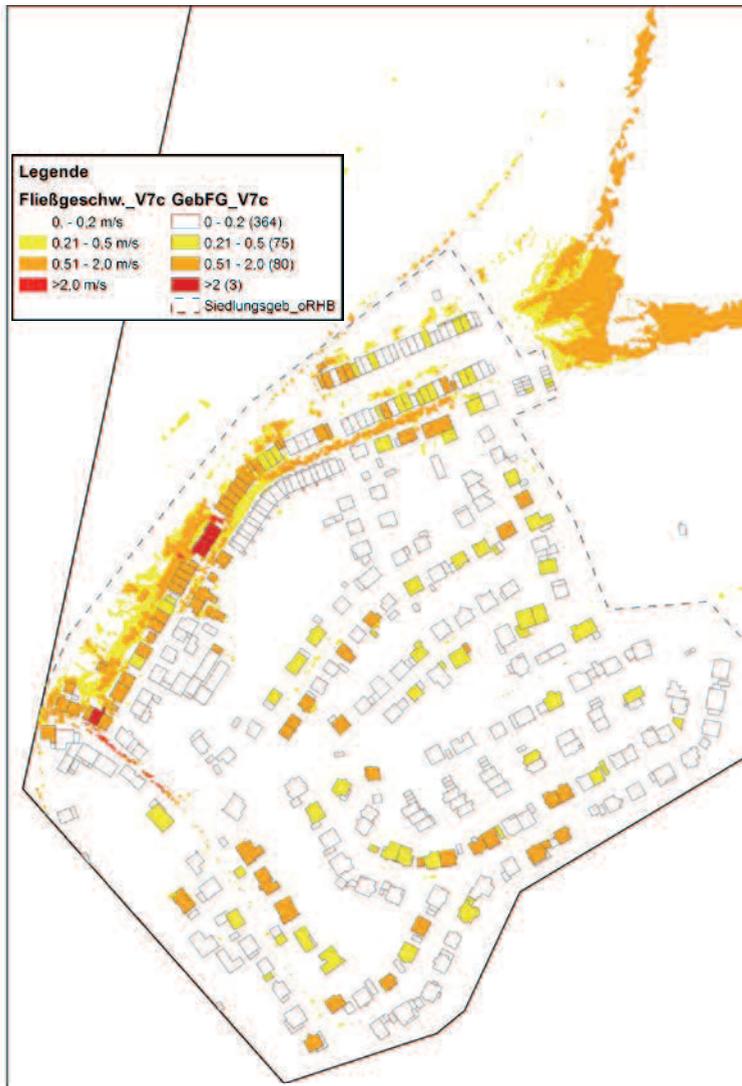
## A.2.36 Variante 7b – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



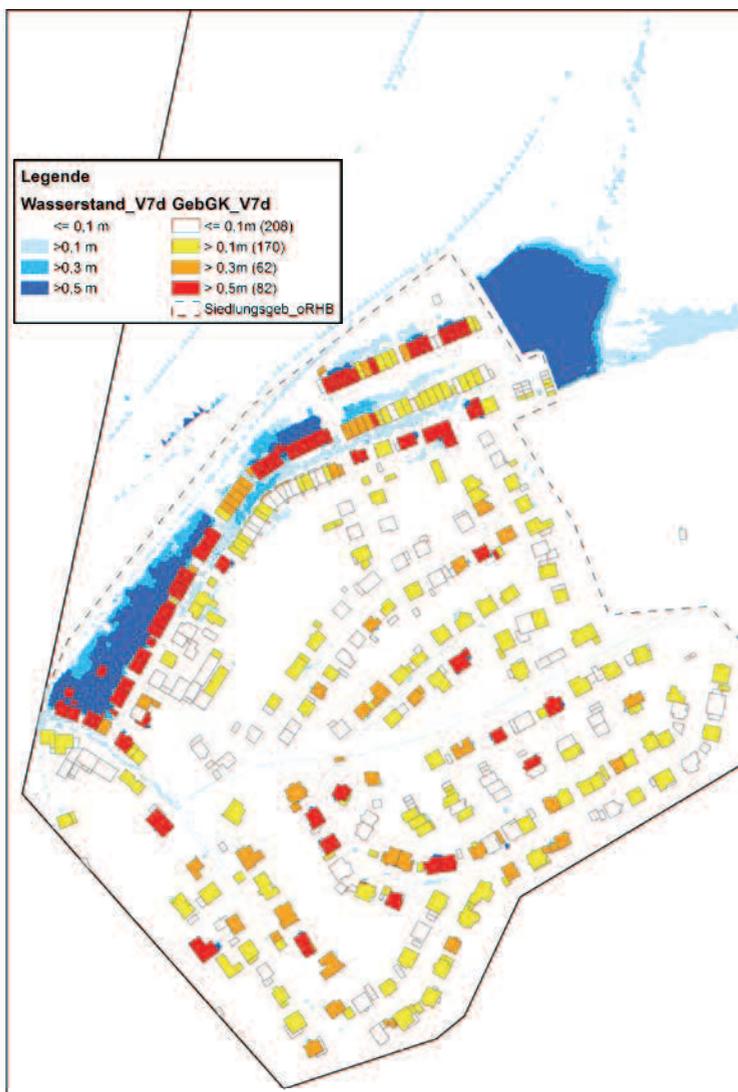
### A.2.37 Variante 7c – Gefährdungskarte Wasserstand



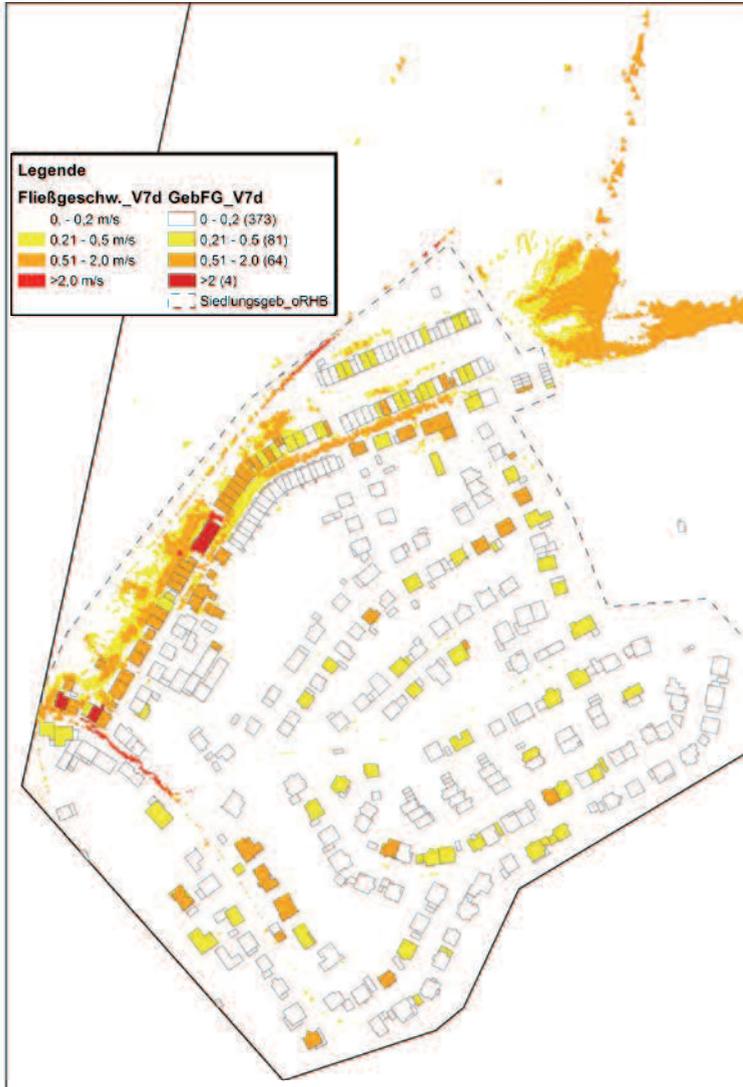
## A.2.38 Variante 7c – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



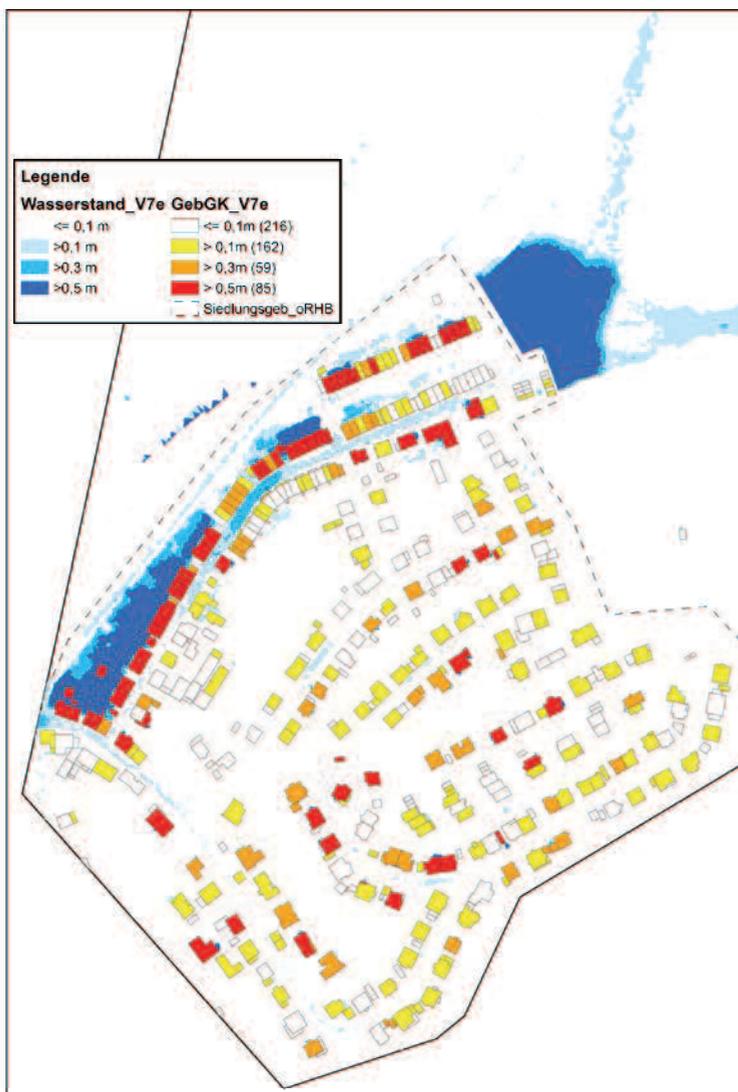
### A.2.39 Variante 7d – Gefährdungskarte Wasserstand



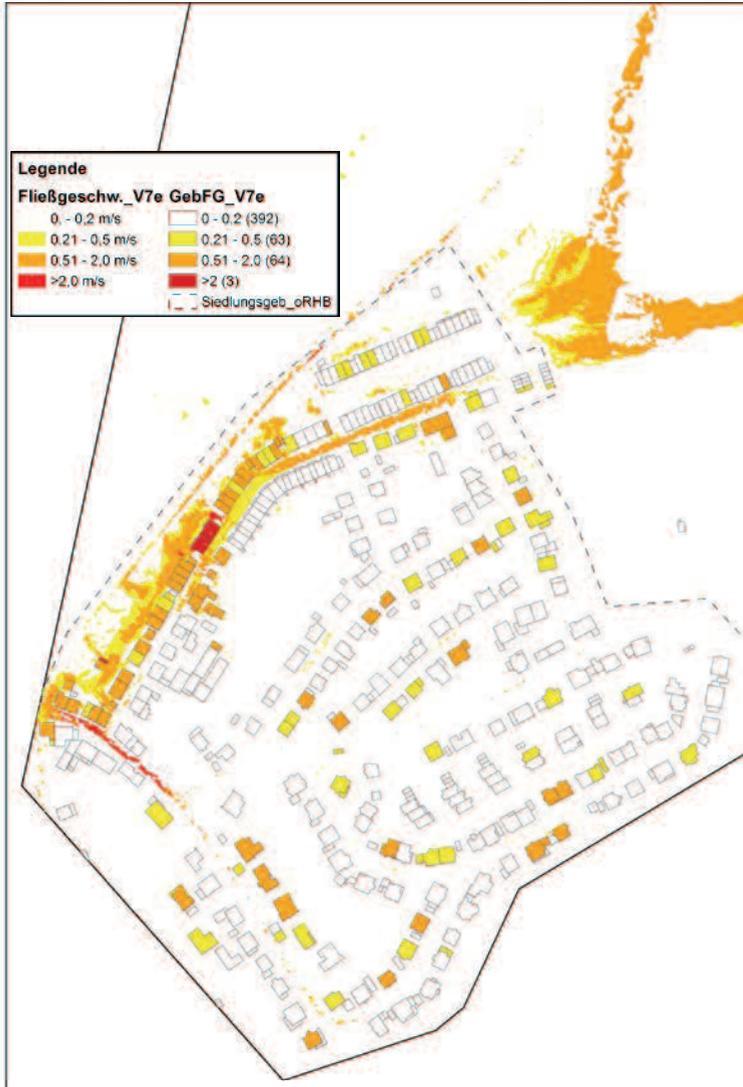
## A.2.40 Variante 7d – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit



### A.2.41 Variante 7e – Gefährdungskarte Wasserstand



## A.2.42 Variante 7e – Gefährdungskarte Fließgeschwindigkeit





---

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Dipl.-Ing. Hagen Henrik Hürter

## Beruflicher Werdegang

seit 04/2012

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet  
Siedlungswasserwirtschaft der TU Kaiserslautern

2009 - 2011

wissenschaftliche Hilfskraft am Fachgebiet  
Siedlungswasserwirtschaft der TU Kaiserslautern

## Ausbildung und Studium

seit 07/2015

Kollegiat im Helmut Bode-Promotionskolleg an der  
TU Kaiserslautern

04/2011 – 05/2011

Praktikum in der Stabsstelle Regenwassermanage-  
ment bei HAMBURG WASSER

04/2007 – 03/2012

Studium des Bauingenieurwesens an der TU Kai-  
serslautern

03/2007

Praktikum bei der Firma Küntzler GmbH & Co KG,  
Waldfishbach-Burgalben

05/2006 - 02/2007

Zivildienst am Studierendenwerk Kaiserslautern

03/2006

Abitur am Gymnasium am Rittersberg,  
Kaiserslautern



# Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen

---

## bereits veröffentlicht wurden

Band 1 **Tagungsband (2018)**

Regenwasser in urbanen Räumen  
aqua urbanica trifft RegenwasserTage 2018  
ISBN 978-3-95974-086-9

Band 2 **Dissertation Hürter, Hagen (2018)**

Erarbeitung gebietsspezifischer Anwendungsempfehlungen  
für bi-direktional gekoppelte 1D-2D-Überflutungsberechnungen  
ISBN 978-3-95974-087-6

