

Schriftenreihe Band 4 | 2018

wasser infrastruktur ressourcen



**GIS-basierte Starkregen-Risikoanalyse
unter besonderer Berücksichtigung von
Datenerfordernissen und methodischer
Aussagefähigkeit**

Christian Scheid

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



ISSN: 2570-1460 | ISBN: 978-3-95974-102-6

GIS-basierte Starkregen-Risikoanalyse unter besonderer Berücksichtigung
von Datenerfordernissen und methodischer Aussagefähigkeit

4
wir

GIS-basierte Starkregen-Risikoanalyse unter besonderer Berücksichtigung von Datenerfordernissen und methodischer Aussagefähigkeit

Dipl.-Ing. Christian Scheid

Kaiserslautern

2018

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 4

Herausgeber: Institut Wasser Infrastruktur Ressourcen

Technische Universität Kaiserslautern
Paul-Ehrlich-Straße 14
67663 Kaiserslautern

Verfasser: Scheid, Christian

Verlag: Technische Universität Kaiserslautern

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

D-386

© Institut Wasser Infrastruktur Ressourcen · Kaiserslautern 2018



Dieses Werk und alle Einzelbeiträge sind unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung 4.0 International (CC BY) zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

Der Inhalt der vorliegenden Beiträge unterliegt der Eigenverantwortung der Autorinnen und Autoren und stellt nicht zwangsläufig die Meinung des Herausgebers dar.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 2570-1460

ISBN 978-3-95974-102-6

GIS-basierte Starkregen-Risikoanalyse unter besonderer Berücksichtigung von Datenerfordernissen und methodischer Aussagefähigkeit

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

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christian Scheid

Dekan Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt

Prüfungskommission

Vorsitzender Prof. Dr. rer. nat. Robert Jüpner

1. Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt

2. Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. Dirk Muschalla

Datum der Prüfung 29.08.2018

Kaiserslautern 2018

(D 386)

Danksagung

Zunächst möchte ich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt, meinen großen Dank aussprechen. Er war jederzeit sowohl fachlich mit wertvollem Ratschlag und wohlwollend-konstruktiver Kritik wie auch menschlich mit Ermutigung und Zuspruch Wegbereiter und Wegbegleiter dieser Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Muschalla bedanke ich mich ganz herzlich für sein Interesse an meiner Arbeit und seine Bereitschaft zur Übernahme des Koreferats. Vielen Dank auch für die hilfreiche, angenehme Art seiner Mitbetreuung.

Ebenso herzlich danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Robert Jüpner als Vorsitzenden der Prüfungskommission für die Leitung des Promotionsverfahrens.

Ich bedanke mich ferner bei den ehemaligen Projektpartnern HAMBURG WASSER und ZKE - Zentraler Kommunalen Entsorgungsbetrieb Saarbrücken für die fruchtbare Zusammenarbeit im Rahmen der Forschungsvorhaben „RegenInfraStrukturAnpassung Hamburg“ und „UVo Saar“, auf denen wesentliche Erkenntnisgewinne dieser Dissertation gründen.

In diesem Zuge geht mein Dank auch an die Institutionen, die meine Arbeit durch die Bereitstellung vielfältiger Daten unterstützt haben. Dies sind der Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV) der Freien und Hansestadt Hamburg, das Vermessungs- und Geoinformationsamt der Stadt Saarbrücken, das Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung des Saarlandes (LVGL) sowie das Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht (LUWG) Rheinland-Pfalz.

Frau Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz sowie allen ehemaligen und derzeitigen Kolleginnen und Kollegen des Instituts Wasser – Infrastruktur – Ressourcen bin ich sehr dankbar für die Unterstützung und Rücksichtnahme sowie das freundschaftliche, kollegiale Arbeitsklima.

Zuletzt und doch zuallererst danke ich meinen Eltern und meiner gesamten Familie. In besonderer Weise danke ich Jutta, Daniel und Dominik für die mir geschenkte unerschöpfliche Unterstützung und Geduld, die mir während der Bearbeitung ein großer, unverzichtbarer Rückhalt waren.

Kurzfassung

Der Einstieg in ein kommunales Starkregenrisikomanagement muss über eine fundierte Risikoanalyse erfolgen, die mögliche Gefährdungen, Objektbetroffenheiten und Schadenspotenziale identifiziert und bewertet. GIS-basierte Verfahren stellen hierfür vergleichsweise einfache, effiziente Werkzeuge dar, deren Ergebnisse jedoch erheblich von subjektiven Festlegungen, der Qualität der Eingangsdaten und methodischen Einzelaspekten abhängen. Im Gegensatz zur vergleichsweise zuverlässig quantifizierbaren Gefährdung entzieht sich die Objektvulnerabilität bislang mangels Daten noch einer gebietsweiten Beurteilung. Auch die Ersatzgröße Schadenspotenzial lässt sich nur schwer auf mikroskaliger Ebene erfassen.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Gesamtkonzept einer GIS-basierten Risikoanalyse widmet sich zum einen einer methodischen Vertiefung der einzelnen Arbeitsschritte und analysiert die Auswirkungen unterschiedlicher Festlegungen auf die generierten Ergebnisse. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Einfluss der Eingangsdaten und deren optimaler Verwertung. Parallel dazu werden die Abbildungsdefizite der Vulnerabilität näher untersucht und Vorschläge für eine methodische Verbesserung der gebietsweiten Schadenspotenzialanalyse ausgearbeitet. Beide Schritte münden in Empfehlungen zur Anwendung sowie zur Ergebnisverwertung im Zuge der weiterführenden Risikokommunikation.

Die Untersuchungen zeigen, dass vor allem die Vorglättung des Oberflächenmodells (DOM) das Gefährdungsergebnis prägt und dass für Senken und Fließwege unterschiedliche DOM-Aufbereitungen erforderlich sind. Ferner darf die methodische Berücksichtigung weiterer gefährdungsrelevanter Parameter nicht die Effizienz und Handhabungsvorteile beeinträchtigen. Die Abbildung von Vulnerabilitäten auf Objektebene scheitert vorrangig an mangelnden Angaben zur Objektanfälligkeit und zur Bewältigungskapazität, während sich Schadenspotenziale sehr grob anhand von Nutzungsdaten abschätzen lassen. Eine bessere Objektivierung der Schadenspotenzialanalyse lässt sich erreichen, wenn dieses getrennt nach Vulnerabilitätsdimensionen bewertet wird und wenn dazu charakteristische Schadenstypen als Hilfsgrößen der Bewertung verwendet werden.

Risikobewertungen sind vorrangig vulnerabilitätsbezogen, d. h. mit Fokus auf möglichen Schadensausmaße und Präventionsmaßnahmen durchzuführen. Dies kann jedoch nur auf Objektebene, konkret durch bzw. mit dem potenziell Betroffenen erfolgen. Damit wird die Risikoanalyse zwangsläufig zu einem gemeinsamen Prozess und Dialog zwischen kommunaler Verantwortung zu Information und Aufklärung auf der einen Seite und individueller Eigenverantwortung und Risikoakzeptanz auf der anderen Seite.

Abstract

Municipal risk management for heavy rainfall and pluvial flooding must be based on sound risk analysis, which identifies and evaluates potential hazards, exposed properties and damage potentials. GIS-based methods provide comparatively simple and efficient tools for this task. However, their results are highly dependent on subjective determinations, the quality of input data and individual methodology aspects. While flooding hazards can be quantified with comparative reliability, area-wide assessment of building vulnerability has not been possible to date due to lack of data. Damage potential, as a substitute variable, is also difficult to detect and to quantify on a micro-scale level.

On the one hand, the overall concept of a GIS-based risk analysis developed within the scope of this thesis addresses the individual steps with greater methodological detail and analyzes the effects of different determinations on the generated results. Particular attention is paid to the influence of the input data and their optimum use. At the same time, this thesis examines deficits in describing vulnerability more closely and works up proposals for methodological improvement of area-wide analysis of damage potentials. Both steps lead to recommendations on application and use of the results in subsequent risk communication.

The investigations show that, in particular, the prefilling of the digital surface model (DSM) determines the results of hazard analysis. The investigations show that, above all, the prefilling (smoothing) of the DSM determines the results of hazard analysis and that different DSM preparations are essential for an appropriate determination of sinks and flow paths. Furthermore, methodological consideration of further hazard-relevant parameters must not negatively impact the efficiency and handling advantages of this GIS-based approach. The description of vulnerabilities at building level mainly fails due to lack of information on building susceptibility and coping capacity, while municipal usage data can be used to very roughly estimate damage potentials. Improved objectivisation of the damage potential analysis can be achieved if it is evaluated by separate vulnerability dimensions, and if characteristic damage types are used as auxiliary evaluation variables.

Risk assessments must be performed primarily on a vulnerability-basis; that is, they must focus on the potential extents of damage and prevention measures. However, this can only be done at building level, specifically by or with the potentially affected person. This inevitably makes the risk analysis a joint process, requiring dialogue, and the need to balance the municipal responsibility to inform and educate on the one hand with private persons' individual responsibility and risk acceptance on the other.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Veranlassung und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Schwerpunkte der Arbeit	3
1.3	Thematische Abgrenzung	4
1.3.1	Methodische Fokussierung.....	4
1.3.2	Datengrundlage.....	6
1.4	Vorgehensweise.....	7
2	Theoretische Grundlagen	9
2.1	Gefährdung, Vulnerabilität und Risiko – Begriffe und Abgrenzungen	9
2.1.1	Gefahr und Gefährdung	9
2.1.2	Vulnerabilität.....	13
2.1.3	Schaden und Schadenspotenzial	23
2.1.4	Risiko	28
2.2	Kritische und sensible Infrastrukturen als Risikoelemente	32
2.2.1	Kritische Infrastrukturen	32
2.2.2	Sensible Infrastrukturen und Objekte.....	34
2.3	Analyse- und Bewertungsmethoden starkregenbedingter Überflutungsrisiken	35
2.3.1	Gefährdungsanalyse	35
2.3.2	Vulnerabilitäts- und Schadenspotenzialanalyse	42
2.3.3	Risikoanalyse und Risikobewertung.....	46
2.4	Starkregenrisikomanagement.....	49
2.4.1	Grundlagen des Risikomanagements	49
2.4.2	Anwendungskontext Hochwasser- und Starkregenüberflutungen... 50	
2.5	Datengrundlagen der Gefährdungs- und Risikoanalyse	54
2.5.1	Geodaten - Allgemeines und Definitionen	54
2.5.2	Geodatenverwaltung und -verarbeitung	56

2.5.3	AAA®-Modell	58
2.5.4	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS®)	58
2.5.5	Amtliche Liegenschaftskatasterinformationen (ALKIS®)	64
2.5.6	Sonstige Datengrundlagen	67
2.5.7	Datengrundlage der Ergebnisplausibilisierung	68
2.6	Zwischenfazit und Folgerungen	69
3	Material und Methoden	71
3.1	Beschreibung der Untersuchungsgebiete	71
3.2	Datenverarbeitung und Werkzeuge	72
4	Gesamtkonzept der Starkregen-Risikoanalyse	73
4.1	Festlegungen und Konventionen	73
4.2	Methodik der topografischen Gefährdungsanalyse	75
4.2.1	Gefahren- bzw. Gefährdungsindikatoren für Starkregenüberflutungen	75
4.2.2	Erstellung des Digitalen Oberflächenmodells (DOM)	78
4.2.3	DOM-Vorglättung und Senkenevaluation	80
4.2.4	Identifikation von Fließwegen und Flutachsen	81
4.2.5	Bewertung der Überflutungsgefährdung	86
4.3	Methodik der Vulnerabilitäts- und Schadenspotenzialanalyse	91
4.3.1	Überlegungen zur methodischen Umsetzung	91
4.3.2	Indikatoren des Schadenspotenzials von Starkregenüberflutungen .	96
4.3.3	Bewertung des Schadenspotenzials	98
4.4	Methodische Umsetzung der Exposition	106
4.5	Methodik der Risikobewertung	107
5	Untersuchungen zur topografischen Gefährdungsanalyse	109
5.1	Analyse der Datengrundlage	109
5.2	Analyse der Topografie	112
5.2.1	Untersuchungen zur DGM-Interpolation	112
5.2.2	Untersuchungen zur DOM-Vorglättung	119
5.2.3	Geomorphologische Analyse	126
5.3	Überflutungsgefährdung im Bereich von Senken	132

5.3.1	Senkenparameter zur Gefahrenklassifizierung	132
5.3.2	Klassenanzahl und Klassengrenzen.....	137
5.3.3	Variantenuntersuchungen zur Gefahrenklassifizierung im Bereich von Senken	139
5.3.4	Berücksichtigung von Senkenüberläufen.....	150
5.4	Überflutungsgefährdung entlang der Fließwege	155
5.4.1	Einfluss unterschiedlicher Fließwegalgorithmen.....	156
5.4.2	Mindestwert der akkumulierten Einzugsgebietsgröße.....	157
5.4.3	Ansätze zur Gefahrenklassifizierung der Fließwege.....	158
5.4.4	Breitenfestlegung der Gefahrenzone entlang der Fließwege	160
5.5	Starkregen-Gefahrenkarte	161
5.6	Fazit zur topografischen Gefährdungsanalyse	163
6	Untersuchungen zur Schadenspotenzialanalyse.....	165
6.1	Analyse der Datengrundlage	165
6.1.1	Einsatzbereiche und Ergebnisrelevanzen.....	165
6.1.2	Auswertung der ALKIS®-Datengrundlage	167
6.2	Schadenspotenzialanalyse für Gebäude und Risikoobjekte	171
6.2.1	Pauschale Schadenspotenzialbewertung (Ansatz 1)	171
6.2.2	Schadenspotenzialbewertung nach Vulnerabilitätsdimensionen (Ansatz 2)	176
6.2.3	Schadenspotenzialbewertung anhand charakteristischer Schadenstypen (Ansatz 3).....	178
6.2.4	Implementierung weiterer Gebäudeinformationen	182
6.3	Schadenspotenzialkarte.....	185
6.4	Gesamtfazit zur Schadenspotenzialanalyse	186
7	Risikobewertung	189
7.1	Identifikations- und Überlagerungsansätze.....	189
7.1.1	Visuelle Risikobewertung.....	189
7.1.2	Risikobewertung auf Grundlage einer Überlagerungsmatrix	190
7.2	Risikokarte.....	195
7.3	Ergebnisplausibilisierung	197
7.3.1	Vorbemerkungen	197

7.3.2	Ereignisübergreifende Plausibilisierung	198
7.3.3	Ereignisbezogene Plausibilisierung	200
7.3.4	Einzelfallbezogene Plausibilisierung	203
7.4	Fazit	204
8	Gesamtdiskussion	209
8.1	Einflussgröße Gefährdung	209
8.2	Einflussgröße Schadenspotenzial	211
8.3	Risikoanalyse	212
8.4	Empfehlungen und Hinweise	213
9	Schlussfolgerungen und Ausblick	217
9.1	Erkenntnisse und Schlussfolgerungen	217
9.2	Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick	221
10	Literaturverzeichnis	225
Anhang	247
A-1	Beschreibung der Untersuchungsgebiete	247
A-2	Anwendungsuntersuchungen zu topografischen Indices	250
A-3	Untersuchungen zur Vorglättung	254
A-4	Variantenvergleich zur Gefahrenklassifizierung von Senken	259
A-5	Untersuchungen zum Effekt des Senkenüberlaufs	263
A-6	Schadenspotenzialanalyse für Gebäude	265
A-7	Schadenspotenzialklassifizierung neuralgischer Punkte	270
A-8	Risikobewertung	271
A-9	Risikoplausibilisierung	272

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Inhaltliche Konzeption und Vorgehensweise der Arbeit	8
Abbildung 2-1:	Das IPCC-Vulnerabilitätskonzept.....	16
Abbildung 2-2:	Denkmodell zur Beschreibung der Objektanfälligkeit für verschiedene Gefährdungen	20
Abbildung 2-3:	Einteilung von Überflutungsschäden.....	25
Abbildung 2-4:	Beispiele grafischer Risikodarstellungen	31
Abbildung 2-5:	KRITIS-bezogene Risiken und erforderliche Risikokomponenten	31
Abbildung 2-6:	Sektoren und Branchen Kritischer Infrastrukturen	33
Abbildung 2-7:	Risikomanagementprozess nach ISO 31000:2009.....	49
Abbildung 2-8:	Darstellungsvarianten Risikomanagement Starkregen und Sturzfluten	52
Abbildung 4-1:	Methodische Umsetzung des Risikobegriffs für den Anwendungskontext Starkregenüberflutung	74
Abbildung 4-2:	Systematik der indikatorbasierten topografischen Gefährdungsanalyse	77
Abbildung 4-3:	Workflow der topografischen Gefährdungsanalyse	77
Abbildung 4-4:	Beispiel eines Wichtungsrasters (Abflussbeiwerte) für die Fließwegakkumulation	85
Abbildung 4-5:	Denkmodell zur Entstehung von Überflutungsschäden als Resultat der Interaktion von Gefährdung und Vulnerabilität	92
Abbildung 4-6:	Schadenskennlinien als Denkmodell zur Bestimmung des Schadenspotenzials und qualitativen Vulnerabilitätsbeschreibung	94
Abbildung 4-7:	Systematik der indikatorbasierten Schadenspotenzialanalyse, verändert nach (Schmitt und Scheid 2014)	97
Abbildung 5-1:	Auswirkungen der Interpolationsansätze NaN und IDW1 auf die Senkenausprägung am Beispiel des Untersuchungsgebiets 3 (Neuwied).....	113
Abbildung 5-2:	Streubreiten der Höhendifferenzen zwischen NaN-Interpolation und IDW1 bis IDW4 (IDW1* bis IDW4* ohne Gebäudezonen), Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)	115
Abbildung 5-3:	Auswirkungen der Interpolationsansätze NaN und IDW1 bei der Schließung von DGM-Lücken im Bereich von Brücken, Beispiel A, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)	117

Abbildung 5-4:	Einfluss der Brückenabmessungen auf die Schließung von DGM-Lücken, Interpolationsansatz IDW1, Beispiele B und C, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)	117
Abbildung 5-5:	Systematik der untersuchten Varianten zur Senkenvorglättung und -evaluation	120
Abbildung 5-6:	Senkenbezogene Auswertung ausgewählter Vorglättungsvarianten, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	121
Abbildung 5-7:	Senkenbezogene Auswertung ausgewählter Vorglättungsvarianten, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)	121
Abbildung 5-8:	(a) Absolute und (b) relative Klassenhäufigkeiten der Fließwegzellen für ausgewählte Vorglättungsvarianten, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	122
Abbildung 5-9:	Häufigkeitsverteilung der maximalen Fließweglängen je Senkeneinzugsgebiet für ausgewählte Vorglättungsvarianten, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	123
Abbildung 5-10:	Hypsometrische Kurven der Untersuchungsgebiete 1 bis 3: (a) kumulativ und (b) normiert nach Langbein (1947)	127
Abbildung 5-11:	Verteilung der Hangneigungsstufen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Untersuchungsgebiete 1 bis 3.....	128
Abbildung 5-12:	Neigungsklassen als rasterscharfe Berechnung (a) und als mittlere Neigung je Senkeneinzugsgebiet (b), Untersuchungsgebiet Saarbrücken	129
Abbildung 5-13:	(a) Kennzeichnungsschema zur Krümmungsrichtung und -tendenz (Ad-hoc-AG Boden 2005) und (b) Krümmungsverteilungen im urbanen Raum, Beispiel Untersuchungsgebiet Saarbrücken (Schmitt und Scheid 2014)	130
Abbildung 5-14:	Korrelation zwischen (a) Flächenausdehnung bzw. (b) max. Senkentiefe und Senkenvolumen, Untersuchungsgebiet Saarbrücken (Beispiel z10002)	134
Abbildung 5-15:	Kumulierte Häufigkeitsverteilung (Unterschreitungshäufigkeiten) der Senkenvolumina $V_{S,max}$, Untersuchungsgebiet Saarbrücken (Beispiel z10002).....	138
Abbildung 5-16:	Kumulierte Häufigkeitsverteilung (Unterschreitungshäufigkeiten) der Senkenretentionshöhen h_{Ret} , Untersuchungsgebiet 1 (Beispiel z10002).....	142
Abbildung 5-17:	Absolute Flächen der Gefahrenklassen der Senken (GS) je Klassifizierungsvariante bei Vorglättung z10002, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	145
Abbildung 5-18:	Anzahl exponierter Gebäude je Klassifizierungsvariante und Gefährdungsklasse bei Vorglättung z10002, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	146

Abbildung 5-19:	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen von h_{Ret} und Klassenanteile für die Vorglättungsvarianten z10002 und z10520, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	149
Abbildung 5-20:	Auswirkungen der Vorglättungsvarianten z10002 und z10520 auf die Gebäudeexposition für die Klassifizierungsansätze T1, R1 und TVR1, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	149
Abbildung 5-21:	Beispiel für die Netztopologie von Senken.....	151
Abbildung 5-22:	Überlaufvolumina und -anteile je Ansatz zum Abflussbeitrag der Kanalisation für neun ausgewählte Starkregenereignisse am Beispiel Saarbrücken (Scheid und Schmitt 2016)	152
Abbildung 5-23:	Modell zum Einfluss des Senkenüberlaufs auf die Retentionshöhe h_{Ret} verschiedener Senken.....	153
Abbildung 5-24:	Ausgewähltes Beispiel für abweichende Gefährdungsergebnisse aufgrund unterschiedlicher Fließwegalgorithmen, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	156
Abbildung 5-25:	Breitennormierte Abfluss-Wasserstands-Beziehungen nach Gauckler-Manning-Strickler für verschiedene Neigungsstufen bei (a) Grünland / Vegetation und (b) Asphalt (eigene Darstellung).....	158
Abbildung 5-26:	Anzahl exponierter Gebäude je Glättungsvariante und Fließweg-Gefährdungsklasse (GF), Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken).....	160
Abbildung 5-27:	Anzahl exponierter Gebäude je Fließweg-Gefährdungsklasse (GF) für unterschiedliche Fließwegbreiten, Varianten c10000 und c10529, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken).....	161
Abbildung 5-28:	Beispiel der Starkregen-Gefahrenkarte mit sechs Gefährdungszonen und der Gebäudeexposition, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	162
Abbildung 6-1:	Auswertesystematik zur Identifikation möglicher Schadenspotenzialindikatoren des ALKIS®-OK (eigene Darstellung).....	168
Abbildung 6-2:	Erfassungsgrade möglicher Schadenspotenzialindikatoren des ALKIS®-OK im Ländervergleich, Datengrundlage: AdV (2015a) (eigene Darstellung)	169
Abbildung 6-3:	Schadenspotenzialklassifizierung des Indikators Gebäudenutzung SGN nach Ansatz 1, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied).....	176
Abbildung 6-4:	Summenwerte des Gesamtschadenspotenzials ΣSGN_2 nach differenzierter Klassifizierung des Indikators Gebäudenutzung anhand verschiedener Vulnerabilitätsdimensionen, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)	177
Abbildung 6-5:	Methodik der differenzierten Schadenspotenzialbewertung des Indikators Gebäudenutzung (SGN_3) anhand charakteristischer Schadenstypen (Ansatz 3)	179

Abbildung 6-6:	Kennwerte des Gesamtschadenspotenzials ΣKSG_3 gemäß Ansatz 3 für unterschiedliche OWA, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied).....	181
Abbildung 6-7:	Summenwerte des Gesamtschadenspotenzials ΣSGN_3 nach differenzierter Klassifizierung des Indikators Gebäudenutzung anhand charakteristischer Schadenstypen, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied).....	182
Abbildung 6-8:	Beispiele für Schadenspotenzialkarten für Gebäude, differenziert nach Vulnerabilitätsdimensionen (a-c) und als resultierendes Maximum (d), Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied).....	185
Abbildung 7-1:	Multiplikations- und Additionsansatz zur Risikobewertung als Überlagerung von Gefährdung G und Schadenspotenzial S.....	190
Abbildung 7-2:	Beispiel einer Risikokarte gemäß Multiplikationsansatz (oben) und Additionsansatz ohne Korrektur und Gewichtung (unten), Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	192
Abbildung 7-3:	Beispiel einer Risikokarte gemäß $sgn(G)$ -modifiziertem Additionsansatz, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	193
Abbildung 7-4:	Statistische Verteilung der Überflutungsrisiken für Gebäude nach verschiedenen Überlagerungsansätzen von Gefährdung G und Schadenspotenzial S, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	194
Abbildung 7-5:	Modifikation des Additionsansatzes zur Risikobewertung als Überlagerung von Gefährdung G und Schadenspotenzial S.....	195
Abbildung 7-6:	Beispiel einer Starkregen-Risikokarte mit ergänzender Darstellung von Gefährdungsklassen und neuralgischen Punkten, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken).....	196
Abbildung 7-7:	Häufigkeitsverteilungen der Niederschlagsabflusshöhen je Einzelsenke für ausgewählte Starkregenereignisse, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken), (Schmitt und Scheid 2014).....	202

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Begriffsdefinitionen Gefahr und Gefährdung.....	11
Tabelle 2-2:	Schadensbeeinflussende Gefährdungsparameter für Starkregenüberflutungen	12
Tabelle 2-3:	Relevante Begriffsdefinitionen Vulnerabilität.....	14
Tabelle 2-4:	Dimensionen der Vulnerabilität gemäß Definition nach UNISDR	15
Tabelle 2-5:	Fähigkeiten eines resilienten Systems in Bezug auf unterschiedliche Herausforderungen.....	21
Tabelle 2-6:	Übersicht gebräuchlicher Risikodefinitionen für den Anwendungskontext Hochwasser und Starkregenüberflutungen (<i>fluvial and pluvial floods</i>)	29
Tabelle 2-7:	Teilsysteme, Aussage- und Ergebnistiefen verschiedener Methoden der Gefährdungsanalyse nach DWA-M 119.....	38
Tabelle 2-8:	Themenfelder, Indikatoren und Kriterien zur Abschätzung der Verwundbarkeit der Bevölkerung gegenüber Starkregenereignissen (nach BBK 2013)	44
Tabelle 2-9:	Ausgewählte GIS-Produkte mit Anwendungsbezug topografische Gefährdungsanalyse	57
Tabelle 2-10:	Dateninhalte des ATKIS® (AdV 2009)	59
Tabelle 2-11:	Hierarchieebenen des ALKIS®-Objektartenkatalogs mit Beispiel	65
Tabelle 2-12:	Nutzungsartenbereiche und –gruppen des AdV-Nutzungsartenkatalogs	66
Tabelle 3-1:	Zusammenfassung der Gebietsparameter, Untersuchungsgebiet 1 bis 3.....	71
Tabelle 4-1:	Parameter und Indikatoren zur Beschreibung der Gefahrenkomponenten.....	76
Tabelle 4-2:	Kategorisierung von Algorithmen zur Fließrichtungsberechnung.....	82
Tabelle 4-3:	Parameter und Indikatoren zur Beschreibung des Schadenspotenzials auf Untersuchungsgebietsebene.....	97
Tabelle 4-4:	Entwurf einer objektbezogenen Vulnerabilitäts- und Schadenspotenzialanalyse.....	105
Tabelle 5-1:	Datenpools der topografischen Gefährdungsanalyse mit Bewertung des jeweiligen Datenbedarfs, verändert nach (Schmitt und Scheid 2014).....	110
Tabelle 5-2:	Untersuchte Interpolationsverfahren: Parameter und Untersuchungsbereiche	114

Tabelle 5-3:	Variantencodierung zur Vorglättung und Senkenauswahl	120
Tabelle 5-4:	Auswertung der Verlängerung der maximalen Fließwege je Senke für unterschiedliche Vorglättungsvarianten gegenüber der Grundvariante c10000, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken).....	124
Tabelle 5-5:	GIS-gestützt ermittelte Senkenparameter	133
Tabelle 5-6:	Variantenübersicht zur Gefahrenklassifizierung von Senken	139
Tabelle 5-7:	Gefahrenklassifizierung von Senken anhand der Senken- bzw. Einstautiefe (Varianten T0 und T1).....	140
Tabelle 5-8:	Gefahrenklassifizierung von Senken anhand des Senkenvolumens (Variante V0)	141
Tabelle 5-9:	Gefahrenklassifizierung von Senken anhand der Retentionshöhe (Varianten R0 und R1)	141
Tabelle 5-10:	Gefahrenklassifizierung anhand der Senkengröße (Variante TV0)	143
Tabelle 5-11:	Abzüge auf die h_{Ret} -bezogene Gefahrenklassifizierung von Senken anhand der Senkengröße (Variante TVR1)	144
Tabelle 5-12:	Regenspenden ausgewählter Starkniederschläge nach (DWD 2016) für die Untersuchungsgebiete 1 bis 3	157
Tabelle 5-13:	Vorschlag für Gefahrenklassen von Fließwegen GF anhand der akkumulierten Einzugsgebietsgröße	159
Tabelle 6-1:	Datenpools der Schadenspotenzialanalyse mit Bewertung des jeweiligen Datenbedarfs, verändert nach (Schmitt und Scheid 2014).....	166
Tabelle 6-2:	Verschiedene Informationstypen von ALKIS®-Objektwertarten.....	170
Tabelle 6-3:	Informationstypen der bewertungsrelevanten ALKIS®-Objektwertarten für Rheinland-Pfalz (OWA-RP)	170
Tabelle 6-4:	Vorschlag einer pauschalen Schadenspotenzialklassifizierung des Indikators Gebäudenutzung SGN	172
Tabelle 6-5:	Qualitätskategorien von OWA zur Beschreibung des Schadenspotenzialindikators Gebäudenutzung	174
Tabelle 6-6:	Absolute Häufigkeiten der Qualitätskategorien (A bis D) der OWA-RP je Schadenspotenzialklasse zur Beschreibung des Indikators Gebäudenutzung SGN	175
Tabelle 6-7:	Katalog von Schadenstypen für Gebäude und Bauwerke, Ansatz 3.....	179
Tabelle 6-8:	Beispiele für ergänzende Textinformationen der ALKIS®-Attributkennung NAM zu den Objektwertarten (OWA) der Gebäudenutzung	183
Tabelle 6-9:	Beispiele für ALKIS®-Inhalte mit überflutungsrelevanten Gebäudedetails	184

Tabelle 6-10:	Beispiele für Stadtbiototypen mit differenzierten Nutzungsinformationen, Biotopkartierung Hamburg (nach Brandt und Engelschall 2011)	184
Tabelle 7-1:	Verschiedene Daten- und Informationspools zur Ereignishistorie – Merkmale und Charakterisierung.....	199

Abbildungen und Tabellen im Anhang

Abbildung A-1:	Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken): Oberflächenmodell	247
Abbildung A-2:	Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg): Oberflächenmodell	248
Abbildung A-3:	Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied): Oberflächenmodell	249
Abbildung A-4:	Anwendung (a) des log. Stream Power Index (SPI), (b) des Compound Topographic Index (CTI) und (c) des relativen Topographic Position Index (TPI) auf urbane Strukturen, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	253
Abbildung A-5:	Auswertung Vorglättungsvarianten c10000 – c10229, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	254
Abbildung A-6:	Auswertung Vorglättungsvarianten c10300 – c10529, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	255
Abbildung A-7:	Auswertung Vorglättungsvarianten c10000 – c10229, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)	256
Abbildung A-8:	Auswertung Vorglättungsvarianten c10300 – c10529, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)	257
Abbildung A-9:	Flächenanteile der Gefährdungsklassen in den Senkenbereichen je Variante, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken).....	259
Abbildung A-10:	Absolute Flächen der Gefährdungsklassen in den Senkenbereichen je Variante, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	259
Abbildung A-11:	Gefährdungsklassenanteile der exponierten Gebäude je Variante, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	260
Abbildung A-12:	Anzahl exponierter Gebäude je Gefährdungsklasse und Variante, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	260
Abbildung A-13:	Flächenanteile der Gefährdungsklassen in den Senkenbereichen je Variante, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)	261
Abbildung A-14:	Absolute Flächen der Gefährdungsklassen in den Senkenbereichen je Variante, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg).....	261
Abbildung A-15:	Gefährdungsklassenanteile der exponierten Gebäude je Variante, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)	262
Abbildung A-16:	Anzahl exponierter Gebäude je Gefährdungsklasse und Variante, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)	262
Abbildung A-17:	Auswirkungen des Überlaufeffekts auf die Retentionshöhe h_{Ret} , Beispiel 1	263

Abbildung A-18:	Auswirkungen des Überlauseffekts auf die Retentionshöhe h_{Ret} , Beispiel 2	264
Abbildung A-19:	Beispiel einer Risikokarte gemäß $sgn(G)$ -modifiziertem Additionsansatz, G und S gleichgewichtet (oben) und mit 2-fach gewichtetem Schadenspotenzial S (unten), Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	271
Abbildung A-20:	Beispiel einer Einsatzkarte für Feuerwehreinsätze des Zeitraums 2009-2013, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	273
Abbildung A-21:	Plausibilisierung ermittelter Gefährdungsbereiche anhand von Feuerwehreinsätzen (Zeitraum 2009 – 2013), Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)	273
Tabelle A-1:	Wertespektren der Senkenparameter, Untersuchungsgebiete 1 bis 3	258
Tabelle A-2:	Schadenspotenzialklassifizierung der OWA nach Vulnerabilitätsdimensionen SGN_2 (Ansatz 2) mit Vergleich zu SGN_1 , Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)	266
Tabelle A-3:	Schadenstypen mit Ausprägungszuordnung (ASG) der Vulnerabilitätsdimensionen, Bewertungsansatz 3	267
Tabelle A-4:	Zuordnung der Relevanz (REL) typischer Schadensbilder zu Objektwertarten (OWA) Gebäude, Gebiet 3 (Neuwied)	268
Tabelle A-5:	Vergleich der resultierenden Schadenspotenzialklassifizierung nach den Ansätzen 1 bis 3, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)	269
Tabelle A-6:	Schadenspotenzialklassifizierung neuralgischer Punkte SK_P	270

Abkürzungen und Formelzeichen

Zeichen	Erläuterung
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder
A _E	Einzugsgebietsfläche
AFIS®	Amtliches Festpunktinformationssystem
ALB	Automatisiertes Liegenschaftsbuch
ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
ALKIS®	Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem
ALKIS®-OK	ALKIS®-Objektartenkatalog
ALS	Airborne Laserscanning
A _{S,max}	Flächenausdehnung der Senke
ASG	Schadenstyp-Ausprägung
ATKIS®	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
A _U	Undurchlässige Einzugsgebietsfläche
CLC	Corine Land Cover
CTI / W	Compound Topographic Index / Wetness Index
DGM / DTM	Digitales Geländemodell / digital terrain model
DHM / DEM	Digitales Höhenmodell / digital elevation model
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DOM / DSM	Digitales Oberflächenmodell / digital surface model
DOP	Digitales Orthophoto
DTK	Digitale Topografische Karte
E	Exposition oder elements at risk
G	Resultierende Gesamtgefährdung
GDI-DE	Geodateninfrastruktur Deutschland
GF	Gefahrenklasse Fließweg (Einzelkriterium)
GG	Gefahrenklasse Gewässer (Einzelkriterium)
GIS	Geografisches Informationssystem
GK	Gefahrenzuschlag Kanalisationsüberstau
GK _F	Gefahrenklasse Fließweg (resultierend)
GK _G	Gefahrenklasse Gewässer (resultierend)
GK _S	Gefahrenklasse Senken (resultierend)
GS	Gefahrenklasse Senken (Einzelkriterium)
GT	Gefahrenzuschlag Topografie

Zeichen	Erläuterung
H	Natural hazard
h_{Ret} / h_{Ret}^*	Retentionshöhe Senke / Effektive Retentionshöhe Senke
$h_{S,max}$	Maximale Senkentiefe
HWRM	Hochwasserrisikomanagement
I	Hazard intensity
IDW	Interpolationsmethode Inverse Distance Weighting
KRITIS	Kritische Infrastruktur(en)
KSG	Schadenspotenzial-Kennwert, indiziert mit: PH: physisch human; PM: physisch nicht-human (materiell); SK: sozio-kulturell; W: ökonomisch; U: ökologisch
LiDAR	Light Detection and Ranging
LoD1/LoD2	Level of Detail 1 bzw. 2
MFD8/MFD ∞	Multi Flow Direction (eight bzw. infinity)
MGN	regionalisierte maximierte Gebietsniederschlagshöhe
NaN	Interpolationsmethode Natural Neighbor
NGDB	Nationale Geodatenbasis
OWA	Objektwertart
P	Hazard probability
PEN	praxisrelevanter Extremwert des Niederschlags
R	1: Risiko; 2: Resilienz
REL	Relevanz des Schadenstyps für OWA
Res	Resilienzindex
S	1: Resultierendes Gesamtschadenspotenzial; 2: Anfälligkeit
SA	Schadenspotenzialzuschlag Gebäudegröße
SB	Schadenspotenzialmodifikator Gebäudeeigenschaften und -details
SE	Schadenspotenzialzuschlag Personenaufkommen
Sev	Ausfallschwere (severity)
SFN	Indikator bzw. Schadenspotenzialklasse Flächennutzung (Einzelkriterium)
SFD8/SFD ∞	Single Flow Direction (eight bzw. infinity)
SGN	Indikator bzw. Schadenspotenzialklasse Gebäudenutzung (Einzelkriterium), indiziert mit: PH: physisch human; PM: physisch nicht-human (materiell); SK: sozio-kulturell; W: ökonomisch; U: ökologisch
SK_F	Schadenspotenzialklasse Flurstücksflächen
SK_G	Schadenspotenzialklasse Gebäude
SK_P	Schadenspotenzialklasse neuralgische Punkte
SP	Schadenspotenzialklasse neuralgische Punkte (Einzelkriterium)
SPI / Ω	Stream Power Index
S_{pot}	Potenzielles Schadensausmaß
TIN	Triangulated irregular network

Zeichen	Erläuterung
TPI	Topographic Position Index
UAV	Unmanned aerial vehicle
V	Vulnerabilität
$V_{S,max}$	maximales Senkenvolumen
$Z_{S,max}$	Höhenlage des maximalen Senkenfüllstands
$Z_{S,min}$	Höhenlage des Senkentieftpunkts

Hinweis

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für beiderlei Geschlecht.

Bildnachweise und Nutzungsrechte verwendeter Geodaten

FHH-LGV (2018): Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung. Datenlizenz Deutschland - Namensnennung – Version 2.0 (dl-de/by-2-0). <http://transparenz.hamburg.de/>

LHS/LVGL (2016): Geodaten SB: Landeshauptstadt Saarbrücken (LHS) und Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung des Saarlandes (LVGL) gemäß Datennutzungsvereinbarung vom 18.02.2016

LUWG RP (2017): Darstellung auf der Grundlage digitaler Daten des Landesamtes für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht (LUWG) Rheinland-Pfalz (gemäß Datennutzungsvereinbarung vom 19.01.2017)

1 Einleitung

1.1 Veranlassung und Problemstellung

Die integrale Siedlungsentwässerung verfolgt neben der Sicherstellung hygienischer Verhältnisse in den Siedlungen die Zielsetzung eines adäquaten Überflutungsschutzes kommunaler Entwässerungssysteme bei Starkregen jenseits der Bemessungsstandards (DWA 2006b). Es erscheint angesichts immer wieder - und oftmals gefühlt häufiger – auftretender Überflutungsereignisse mit teils immensen Schadensbildern mehr denn je erforderlich, dieses Anliegen zu verfolgen. Hinzu kommt, dass die Thematik in Erwartung einer prognostizierten „sehr wahrscheinlichen“ Zunahme solcher Starkregenereignisse (IPCC 2013) auch im Kontext der nationalen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) zu behandeln ist, bei der das Potenzial für Starkregengefahren- und risikokarten zu prüfen ist (Die Bundesregierung 2015).

Ausgehend von der Erkenntnis, dass der Umgang mit urbanen Starkregenüberflutungen nicht allein sektoral entwässerungstechnisch lösbar ist, vollzieht sich in der Siedlungsentwässerung längst ein Paradigmenwechsel, der ein viel stärker risikoorientiertes, präventives Handeln erfordert, aber auch das Bewusstsein für und die Akzeptanz von verbleibende(n) Risiken anmahnt (Schmitt 2011; DWA 2016; Geldof und Kluck 2008). Die Neufassung der Euronorm EN 752 (CEN 2017) schreibt mit dem klaren Bezug auf Überflutungsauswirkungen (*impacts*) bei der Festlegung von Bemessungs- bzw. Überschreitungshäufigkeiten dieses Ansinnen als kommunalen Planungs- und Handlungsauftrag fest.

Angetrieben von der Siedlungsentwässerung und der Motivation, den jenseits der Bemessungsgrenzen öffentlicher Entwässerungssysteme geltenden weiterführenden Anforderungen an den Überflutungsschutz gerecht zu werden, wurden inzwischen vielfältige konzeptionelle Vorschläge und Empfehlungen zur Initiierung und Etablierung eines kommunalen Starkregenrisikomanagements erarbeitet (DWA 2016, 2013b). Dabei erfolgte eine Orientierung an der Vorgehensweise des Hochwasserrisikomanagements (HWRM-RL 2007; LAWA 2017) und deren problemspezifische Transformation auf den Anwendungsfall Starkregenüberflutungen abseits von Gewässerläufen (Schmitt und Worreschk 2011). Zwischenzeitlich ist diese Aufgabenstellung auch verstärkt in den Gesamtfokus der Hochwasserschutzes gerückt; die Themenfelder „Hochwasser“, „Starkregen“ oder „Sturzfluten“ werden zunehmend gemeinsam diskutiert (LAWA 2018; HiOS 2018; LUBW 2016; SiSSI 2016). Auch auf internationaler Ebene ist bezogen auf die Betrachtung von Vulnerabilitäten und Risiken eine grundsätzliche Übertragbarkeit und Vergleichbarkeit der Lösungsansätze

im Rahmen eines „*urban flood risk management*“ (UFRM) erkennbar (u. a. Fratini et al. 2012), auch wenn ursachenbezogen zwischen „*pluvial floods*“ (Starkregenüberflutung und urbane Sturzfluten) und „*fluvial floods*“ (Flusshochwasser) unterschieden wird. In der Tat erscheint es angesichts der Vielfalt in den Erscheinungsformen und Ausprägungen von urbanen Überflutungen (siehe u. a. BMBF 2008) auch sachgerecht und zielführend, ganzheitliche Risikomanagementkonzepte für das Zusammenwirken von Oberfläche, Gewässer und Kanalisation bei Starkregen zu entwickeln und dabei auf ein breites Spektrum an problembezogenen Analysemethoden und -werkzeugen zurück zu greifen.

Allerdings sind Hochwasser- und Überflutungsrisiken in der Regel auf unterschiedlichen Bezugsebenen zu bewerten. Während Hochwasserschutz überwiegend auf der meso- oder gar makroskaligen Ebene (Landkreis, Bundesland, Gewässereinzugsgebiet) konzipiert wird, erfordert die Kleinräumigkeit von Starkregenüberflutungen Überlegungen und Bewertungen auf mikroskaliger Ebene (Einzelgebäude, Straßenzug, Quartier, Kommune). Auf die damit verbundenen Fragen nach der mikroskaligen Quantifizierung und Bewertung des Risikos, insbesondere von Vulnerabilitäten und Resilienzen, existieren bislang nur unbefriedigende methodische Antworten.

Parallel dazu ist die Siedlungsentwässerung, und damit auch die Aufgabenstellung der Überflutungsvorsorge, wie viele andere Ingenieurdisziplinen längst im Informationszeitalter mit den Nutzungschancen von „*big data*“ und des „*internet of things*“ angekommen und verankert (u. a. Blumensaat et al. 2017), was sich beispielsweise an der wachsenden Bedeutung des Messdatenmanagements für Niederschlagsdaten oder Betriebsdaten von Bauwerken zeigt (u. a. Hoppe 2017). Aber auch die Entwicklung der heute zur Risikoanalyse von Starkregenüberflutungen nutzbaren Instrumente, bestehend aus umfangreichen Werkzeugen geografischer Informationssysteme (GIS) und leistungsfähigen Simulationsprogrammen zur hydraulischen Modellierung, ist neben dem schnellen Digitalisierungsfortschritt in der gesamten EDV- und IT-Welt insbesondere auch der deutlich verbesserten Verfügbarkeit hochwertiger (Geo-)Datengrundlagen zu verdanken.

Die verbesserte Datengrundlage hat insbesondere die Einsatzmöglichkeiten starkregenbedingter Gefährdungsanalysen auf der Grundlage hydraulischer 2D- oder 1D/2D-Modellierungen verbessert und diesen Methoden zu einer breiten Anwendungsrelevanz verholfen (Chen et al. 2007; Kang 2009; Sto. Domingo et al. 2010; Russo et al. 2012; Fuchs und Schmidt 2015; Hürter 2018, u.v.m.). Aber auch rein GIS-basierte Methoden der Gefährdungsanalyse haben von den Fortschritten in der Datenverfügbarkeit profitiert und werden als schnelle und einfache erste Analysestufe für urbane Überflutungsgefahren und –risiken empfohlen (DWA 2016) und auch eingesetzt (Krieger 2018). Es mangelt jedoch bislang noch an systematischen Beschreibungen zur Anwendung dieser Methode. Dies gilt zum einen hinsichtlich der Vielzahl von methodischen Details, zum anderen aber auch hinsichtlich einer näheren Betrachtung der Einsatzmöglichkeiten der GIS-Analyse im Rahmen einer Ge-

samtkonzeption zur Risikoanalyse für Starkregenüberflutungen. Dazu sind die vielfältigen Freiheitsgrade bei der subjektiven Festlegung ergebnisrelevanter Parameter und Prozessschritte näher einzugrenzen und daraus entsprechende Empfehlungen und Hinweise abzuleiten. Auch ist der Einfluss der verwendeten Datengrundlage auf die Ergebnisse nicht umfassend geklärt.

1.2 Zielsetzung und Schwerpunkte der Arbeit

Mit dem Merkblatt DWA-M 119 (DWA 2016) liegen allgemeine Beschreibungen und Empfehlungen zur Vorgehensweise bei der Risikoanalyse für urbane Starkregenüberflutungen vor. Definitionsgemäß umfasst diese die Analyse der Überflutungsgefährdung und der Vulnerabilität bzw. des Schadenspotenzials. Die Ausführungen des Merkblatts lassen zwei Sachverhalte erkennen: Einerseits existieren mehrere, unterschiedlich detaillierte und aussagefähige Methoden der Gefährdungsanalyse, die fallbezogen und in abgestufter Form eingesetzt werden können. Andererseits sind die Möglichkeiten der Schadenspotenzialanalyse deutlich geringer und auch bzgl. der erzielbaren Aussagegüte limitiert. Dies beeinflusst schließlich auch die resultierenden Möglichkeiten der Risikobewertung.

Für die konkrete Durchführung einer Starkregen-Risikoanalyse ergeben sich anhand der projektspezifischen Fragestellungen, Zielsetzungen und Untersuchungsrandbedingungen viele subjektive Festlegungsmöglichkeiten und Freiheitsgrade, die zu einer Gefährdungs- und Risikoeinschätzung führen, die darüber hinaus nur unzureichend validiert, bestenfalls plausibilisiert werden kann.

An diesen Punkten setzt die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit an. Durch eine methodische Vertiefung der in (DWA 2016, 2013b) beschriebenen GIS-basierten Arbeitsschritte der Starkregen-Risikoanalyse sollen insbesondere konkretere Hinweise und Empfehlungen zur Festlegung von Eingangs- und Bewertungsparametern formuliert und die ergebnisbestimmende Bedeutung der verwendeten Datengrundlagen aufgezeigt werden. Hierzu wird ein Gesamtkonzept zur Starkregen-Risikoanalyse vorgestellt, das rein GIS-bezogen auf den Einsatz von Simulationswerkzeugen verzichtet.

Bei der darin durchgeführten **topografischen Gefährdungsanalyse** werden die verschiedenen Einflussgrößen (z. B. die Aufbereitung des digitalen Oberflächenmodells) und Gefährdungsindikatoren in detaillierter Form analysiert und bzgl. ihrer methodischen Handhabung und Anwendbarkeit bewertet. Die Ziele dieses Arbeitsschwerpunkts liegen in der verbesserten Ausnutzung des bestehenden Daten- und Anwendungsrahmens und in der Ableitung entsprechender Anwendungsempfehlungen.

Zur methodischen Umsetzung der **Schadenspotenzialanalyse** wird zunächst auf theoretischer Ebene analysiert, warum die Vulnerabilität als eigentliche Risikokomponente für den vorliegenden mikroskaligen Anwendungsbezug nicht abbildbar ist

und diskutiert, in welchem Umfang das Schadenspotenzial hierfür eine geeignete Ersatzgröße darstellt. Darauf aufbauend werden beispielbezogen verschiedene Ansätze entwickelt, wie eine gebietsweite Schadenspotenzialanalyse im Rahmen der zur Verfügung stehenden Daten und Informationen möglichst objektiv und differenziert durchgeführt werden kann. Dabei wird der fundamentale Einfluss der verwendeten Datengrundlage auf die Aussagegüte der Schadenspotenzialanalyse verdeutlicht.

Das Gesamtkonzept richtet ein gesondertes Augenmerk auf die jeweiligen **Datenerfordernisse**. Es wird aufgezeigt, welche Datengrundlagen verfügbar sind, wie diese optimal und umfassend eingesetzt werden können und welche Aussagefähigkeiten sich damit erzielen lassen. Bei dem Bestreben, einzelne Prozessschritte bezüglich ihrer Aussagefähigkeit zu verbessern, ist jedoch darauf zu achten, dass dies nicht zu Lasten einer guten Handhabung und Anwendungseffizienz geht.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der eigenen Anwendung der Methodik auf drei verschiedene Untersuchungsgebiete verfolgt die Arbeit das übergeordnete Ziel, konkrete Anwendungsempfehlungen für die unterschiedlichsten Detailfragen und Einzelschritte zu formulieren. Sie beleuchtet dabei insbesondere den Einfluss der verwendeten Datengrundlage und die Defizite, die sich aus einem Mangel an verfügbaren Daten ergeben.

1.3 Thematische Abgrenzung

Aufgrund der großen thematischen Breite der Starkregen-Risikoanalyse nimmt die vorliegende Arbeit eine thematische Abgrenzung sowohl in Bezug auf die betrachteten Methoden als auch hinsichtlich der Datengrundlagen vor. Beide Aspekte werden nachfolgend erläutert und begründet.

1.3.1 Methodische Fokussierung

Der Begriff „urbane Starkregenüberflutung“ subsummiert ein breites Spektrum an einzelnen Einflüssen, Prozessen, Sachverhalten und Besonderheiten, die solche Ereignisse begleiten und charakterisieren. Einmal sind hoch verdichtete urbane Kerngebiete unmittelbar und allein durch ihre hoch intensive Überregnung überflutungsgefährdet. Ein anderes Mal verursachen größere natürliche oder landwirtschaftlich genutzte Außengebiete mit stark geneigter Topografie enorme Starkregenabflüsse, die sich ihren meist schadensträchtigen Weg durch Siedlungen bahnen. Mal geht die primäre Überflutungsgefahr von ausufernden urbanen Fließgewässern aus; ein anderes Mal führen hydraulische Überlastungen der Entwässerungsinfrastruktur in Form von Kanalüberstau oder verlegter Einläufe zu Überflutungen. Neben den unmittelbaren Niederschlagsparametern existieren viele weitere möglicher Einflussfaktoren für die Entstehung von Starkregenüberflutungen (vgl. u. a. BMBF 2008; Schmitt

2011; Scheid et al. 2013). Insofern ist es auch angemessen, dass für die verschiedenen fallspezifischen Problemstellungen und Randbedingungen einer Gefährdungs- und Risikountersuchung auf verschiedene Methoden der Gefährdungsanalyse zurückgegriffen werden kann (DWA 2013a, 2016).

Innerhalb des Methodenspektrums ist die GIS-Analyse bzw. die **topografische Gefährdungsanalyse** durch den Verzicht auf Simulation ein vergleichsweise einfaches und effizientes Werkzeug, das insbesondere als erster Analyseschritt einer abgestuften Vorgehensweise zur gebietsweiten Identifikation und Erstbewertung von Gefährdungsbereichen und Identifikation potenzieller Risikobereiche empfohlen wird (Illgen und Schäfer 2010; Schmitt 2011; Hoppe et al. 2012). Auch wenn aufgrund schneller technischer Weiterentwicklungen eine deutliche Präferenz der Simulationsmethoden (2D- oder gekoppelte 1D/2D-Modellierung) auf nationaler Ebene erkennbar ist (u. a. Fuchs und Schmidt 2015; LUBW 2016; HSB 2017; Hürter 2018), so besitzt diese Einsatzempfehlung für GIS-Analysen nach wie vor ihre Gültigkeit. Dies wird sowohl durch aktuelle Erhebungen (Krieger 2018) als auch durch laufende Vorhaben (z. B. flächendeckende GIS-Analysen in Hamburg und Berlin) bestätigt.

Die Entscheidung, das hier vorgestellte Gesamtkonzept einer Starkregen-Risikoanalyse GIS-basiert, also unter Implementierung der topografischen Gefährdungsanalyse, zu entwickeln, wird anhand der nachfolgenden Aspekte näher begründet.

Vulnerabilitätsbezogene Risikobewertung

Im Vordergrund der Betrachtungen steht die fachliche Auseinandersetzung mit Überflutungsrisiken und der damit verbundenen Frage nach einer geeigneten Methode, diese zu identifizieren und zu bewerten. Im Zuge dieser Arbeit wird die These aufgestellt, dass Risikobewertungen ungeachtet der erreichbaren Analyse- und Aussagefähigkeiten stärker, als bislang erfolgt, vulnerabilitätsbezogen durchzuführen sind. Es ist daher ein stärkeres Augenmerk auf bestehende Vulnerabilitäten und Schadenspotenziale zu richten als auf Gefährdungsinformationen. Dies relativiert die Bedeutung der eingesetzten Methode zur Gefährdungsanalyse.

Unterschiedliche Aussagefähigkeiten von Gefährdung und Vulnerabilität

Die Risikobewertung muss unterschiedliche Aussagefähigkeiten ihrer Teilinformationen berücksichtigen und vereinigen. Es besteht nach allgemeiner Einschätzung eine Diskrepanz zwischen einer vergleichsweise detaillierten Gefährdungsanalyse und einer nur sehr vagen Schadenspotenzialbetrachtung (DWA 2016). Letztere mindert auch die Aussagefähigkeit der generierten Risikoinformation und relativiert bezüglich der Risikobewertung den Nutzungsvorteil detaillierterer Methoden der Gefährdungsanalyse, beispielsweise der gekoppelten 1D/2D-Simulation.

Einfachheit und Effizienz als methodische Vorteile

Mit GIS-basierten Analyseverfahren lassen sich bei vergleichsweise geringem Datenbedarf und mäßigem Bearbeitungsaufwand erste Gefährdungs- und Risikoinformationen für urbane Starkregenüberflutungen selbst für größere Untersuchungsgebiete generieren. Sie stellen damit ein sehr effizientes Werkzeug mit hoher Anwendungsrelevanz dar, wenn qualitative Aussagen zu möglichen Überflutungsausprägungen im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung ausreichen. Das qualifiziert sie auch im Vergleich zu 2D-Modellierungen von Oberflächenabflüssen. Diese basieren zwar auf einer vergleichbaren topografischen Grundlage, bedürfen jedoch je nach Planungsgebiet einer (deutlich) aufwändigeren Aufbereitung des Digitalen Oberflächenmodells (DOM). Daneben sind beispielsweise die hoch ergebnissensitiven Rauigkeitsansätze für den Oberflächenabfluss festzulegen und abflussrelevante Strukturen genauer zu modellieren. So bedürfen Brücken oder Rohrdurchlässe mit dem Anspruch zuverlässiger Abflussberechnungen einer gesonderten, meist manuellen Bearbeitung. Die GIS-basierte Analyse ermöglicht zudem aufgrund fehlender Simulationsprozesse eine unmittelbare systematische Analyse des Digitalen Geländemodells (DGM) bzw. Digitalen Oberflächenmodells (DOM) als zentrale Datengrundlage hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Ergebnisgüte.

Offene Fragen und Kenntnisdefizite

Trotz der großen Anwendungsbreite der topografischen Gefährdungsanalyse finden sich nur vergleichsweise wenige Publikationen, die über sehr pauschale Angaben zu methodischen Einzelheiten hinausgehen. Tatsächlich bestehen auch für Anwendung der topografischen Gefährdungsanalyse zahlreiche Fragen und Kenntnisdefizite zu den ergebnissensitiven Teilprozessen und Eingangsgrößen, denen sich diese Arbeit gesondert widmet.

1.3.2 Datengrundlage

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit widmet sich den Datenerfordernissen für die Analyse starkregenbedingter Überflutungsrisiken. Dazu wird die verfügbare Datengrundlage hinsichtlich der aus ihr generierbaren Aussagefähigkeiten bewertet.

Diese vorliegend durchgeführte Bewertung beschränkt sich auf öffentliche Daten, die i. d. R. von den Landesämtern für Vermessung oder kommunalen Institutionen erhoben, verwaltet und bereit gestellt werden können. Damit soll eine allgemeine Übertragbarkeit und einfache Handhabbarkeit des vorliegenden Gesamtkonzepts gewährleistet werden. Sonstige, beispielsweise kommerzielle Datenpools bleiben unberücksichtigt.

1.4 Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit widmet sich zunächst den theoretischen Grundlagen der starkregenbezogenen Risikoanalyse (Abschnitt 2). Dabei erfolgt eine thematische Einordnung starkregenbedingter Überflutungsrisiken in den Gesamtkontext der Naturrisikoforschung mit einer Zusammenstellung und Erörterung verschiedener relevanter Begriffsdefinitionen. Ausführungen zum Stand des Wissens und der Technik zu den Analyse- und Bewertungsmethoden für Starkregenrisiken sowie zu den verfügbaren relevanten Datengrundlagen schließen den Grundlagenteil ab.

Abschnitt 3 stellt in kompakter Form die Untersuchungsgebiete vor, auf deren Grundlage die vorliegende Methodik entwickelt und angewendet wurde. Daneben werden die verwendeten GIS-Werkzeuge benannt.

Der methodische Teil der Arbeit (Abschnitt 4) beschreibt das grundsätzliche Gesamtkonzept der vorliegenden Starkregen-Risikoanalyse, im Kern bestehend aus einer topografischen Gefährdungsanalyse und einer weiterentwickelten Schadenspotenzialanalyse. Es wird dabei zunächst Bezug genommen auf den Stand der Technik, darüber hinaus jedoch aufgezeigt, welche Abbildungsdefizite für Überflutungsgefahren und Vulnerabilitäten bestehen und welche Indikatoren bei der Prozessbeschreibung erforderlich und nutzbar sind. Im Schwerpunkt werden die eigenen Beiträge zur Bewertung und Analyse der Datengrundlagen und zur methodischen Weiterentwicklung einzelner, ergebnisprägender Arbeitsschritte kurz skizziert.

Anschließend erfolgt die ausführliche Dokumentation der vertiefenden Detailuntersuchungen zur topografischen Gefährdungsanalyse (Abschnitt 5) und zur Schadenspotenzialanalyse (Abschnitt 6). Darauf aufbauend werden in Abschnitt 7 die methodischen Überlegungen zur Risikobewertung dokumentiert, ergänzt um eine Zusammenstellung und Bewertung der möglichen Ansätze zur Ergebnisplausibilisierung.

Da die Diskussion der Ergebnisse und Erkenntnisse der verschiedenen Einzeluntersuchungen zur besseren Nachvollziehbarkeit und Lesbarkeit bereits in den Fazits der Abschnitte 5 und 6 integriert sind, beschränkt sich Abschnitt 8 auf eine kompakte Gesamtdiskussion der Einflüsse von Gefährdung und Schadenspotenzial auf das Ergebnis der Risikobewertung anhand der jeweiligen Datengrundlagen und methodisch erzielbaren Aussagefähigkeiten. Abschnitt 9 formuliert schließlich Schlussfolgerungen und gibt einen Ausblick.

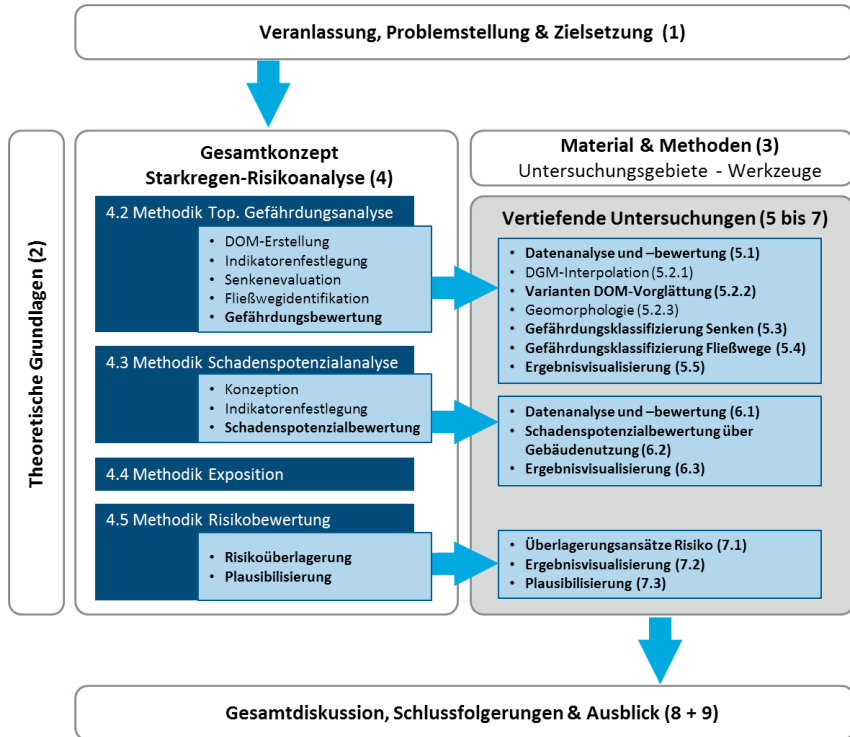


Abbildung 1-1: Inhaltliche Konzeption und Vorgehensweise der Arbeit

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Gefährdung, Vulnerabilität und Risiko – Begriffe und Abgrenzungen

Der Umgang mit Risiken unterschiedlichster Art betrifft und prägt das gesamte menschliche Dasein auf individueller und gesellschaftlicher Ebene ebenso wie die vielfältigen Themenfelder und Anwendungsbereiche von Wissenschaft, Ökonomie und Technik. Daher widmet sich die Risikoforschung als wissenschaftliche Disziplin sowohl theoretisch als auch anwendungsbezogen einem sehr breiten Spektrum an Fragestellungen. Je nach Kontext und Bevölkerungs- bzw. Berufsgruppe existieren unterschiedliche, mitunter sich widersprechende Definitionen des Risikobegriffs (vgl. SRU 1999; Risikokommission 2003; Thywissen 2006). Es herrscht zwischen den unterschiedlichen Bevölkerungs- und Berufsgruppen ein divergierendes Risikoverständnis vor (Kromschröder 2003), je nachdem ob es beispielsweise um ökonomische, soziologische, ökologische, medizinische, technische Fragestellungen geht oder um Risiken aus Naturgefahren, zu denen auch die vorliegend thematisierten Starkregenüberflutungen und Sturzfluten zählen.

Vor diesem Hintergrund ist es zwingend erforderlich, den Risikobegriff und die damit verbundenen Risikokomponenten und Begriffe allgemein und bezogen auf den vorliegenden Problemkontext Starkregenüberflutungen zu definieren und zu diskutieren.

2.1.1 Gefahr und Gefährdung

Gefahr bezeichnet eine potenziell schadensauslösende Einwirkung, die allmählich oder als Ereignis mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftritt (vgl. UNISDR 2004b; WBGU 1999). Die Forschung auf diesem Gebiet unterscheidet dabei zwischen Naturgefahren (*natural hazards*), rein anthropogen hervorgerufenen Gefahren (*man-made hazards*) und als Mischform in menschlich beeinflusste Naturereignisse (*environmental hazards, natural-technical hazards*) (Birkmann 2008; Dikau und Pohl 2007; Smith 2013). Bei Naturgefahren (*natural hazards*) dominieren natürlich auftretende Prozesse oder Naturphänomene das Ereignisgeschehen. Hierzu werden klassischerweise Überschwemmungen, Erdbeben, Dürren, Lawinen oder Erdbeben gezählt, sofern sie ohne maßgebliche anthropogene Einwirkungen eintreten. Demgegenüber existieren eindeutig anthropogen hervorgerufene Gefahrenlagen (*man-made hazards*) in Form von technischen Störfällen, Havarien oder Unfällen aufgrund menschlichen

Versagens oder Fehlverhaltens. Die Dimension solcher menschenverursachter Gefahrenlagen erstreckt sich beliebig weit. Sie beginnen für einzelne Individuen bei alltäglichen Situationen, z. B. durch Fehlverhalten bei der Teilnahme am Straßenverkehr (überhöhte Geschwindigkeit, etc.) bis hin zu Gefahrenlagen globalen oder kontinentalen Ausmaßes (z. B. Nuklearkatastrophe Tschernobyl 1986, Öltankerunglück Exxon Valdez vor Alaska 1989).

In einer Vielzahl von Fällen resultieren Gefahren jedoch aus Naturereignissen, die vermutlich oder nachweislich anthropogen beeinflusst, (mit)verursacht oder ausgelöst werden. In diesen Kontext sind insbesondere auch alle gegenwärtigen und zukünftigen Gefahren einzuordnen, die mit dem Klimawandel und der globalen Erderwärmung in Verbindung gebracht werden (vgl. Die Bundesregierung 2008). Der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) bestätigt in seinem fünften Sachstandsbericht eindeutig den Klimawandel als aktuell ablaufenden Prozess und macht menschliche Einflüsse und Aktivitäten, insbesondere die anhaltende Emission von Treibhausgasen hierfür verantwortlich (IPCC 2013). Vor diesem Hintergrund sind aus Starkregenereignissen resultierende urbane Überflutungen oder Flusshochwasser als solche anthropogen beeinflusste Naturgefahren anzusehen.

Unabhängig davon werden Prozesse erst dann zu einer Gefahr, wenn von ihnen eine potenzielle Schadenswirkung auf ein vulnerables Objekt oder Schutzgut (z. B. die menschliche Gesundheit, ein Sachgut, die Umwelt, soziale, wirtschaftliche oder infrastrukturelle Systeme), das diesem Ereignis räumlich und zeitlich ausgesetzt ist, ausgeht. Birkmann et al. (2013) betonen, dass es sich bei einer Gefahr aufgrund des Zusammenhangs mit dem potenziellen Schaden eines Schutzguts um einen „anthropozentrisch geprägten Begriff“ handelt, der sich maßgeblich über die menschliche Wahrnehmung, Betroffenheit und Bewertung definiert. Diese Sichtweise wird mit noch größerer Bestimmtheit in den Sozialwissenschaften vertreten, indem alle Naturgefahren und -risiken und damit alle Formen von „Naturkatastrophen“ rein anthropozentrisch definiert sind, weil sinngemäß die Natur „weder Gefahren, noch Risiken, noch Katastrophen kennt“ (vgl. Geipel 1992 zitiert in Glade 2003).

Gefahrenereignisse lassen sich nach UNISDR (2004b) anhand verschiedener Merkmale und Kriterien unterscheiden. Zu nennen sind hier die Ereignisintensität (z. B. von Niederschlägen) oder -magnitude (z. B. von Erdbeben), die räumliche Ausdehnung, die Häufigkeit, die Dauer und die Geschwindigkeit von Eintreten und Ausdehnung.

In begrifflicher Abgrenzung zur Gefahr beschreibt die **Gefährdung** eine qualitativ und quantitativ näher bestimmbare Gefahr, also eine Gefahr, deren Unterscheidungs- und Ausprägungsmerkmale (s. o.) konkret bestimmt werden können (Egli 1996; Birkmann et al. 2013), auch, weil sie einem konkreten Ereignis oder Gefahrenlastfall zuzuordnen sind. Lenz (2009) stellt den unmittelbaren Wirkungsbezug der Gefahr auf ein exponiertes Risikoelement in den Vordergrund und definiert die Ge-

fährdung eines Risikoelements als konkretes Resultat aus dem räumlichen und zeitlichen Zusammentreffen von abstrakter Gefahr und tatsächlicher Exposition.

Die Übersetzungen der beiden Begriffe Gefahr und Gefährdung sind im internationalen Sprachgebrauch nicht immer konsequent und eindeutig. Es wird zwar vorrangig für allgemeine Naturgefahren (Starkregen, Hochwasser, Erdbeben, etc.) der Begriff „*hazard*“ verwendet, allerdings kann dieser jedoch auch eine ereignisspezifische „Gefährdung“ ausdrücken, für die häufig auch die Übersetzung „*harmful event*“ anzutreffen ist (Thywissen 2006). Mit stärkerem Bezug auf die Schadenseinwirkung einer Gefährdung wird häufig auch der Begriff „*impact*“ gebraucht, u. a. in CEN (2017).

Die genannte Differenzierung von Gefahr und Gefährdung findet sich für den vorliegenden Anwendungskontext Starkregenüberflutungen ebenfalls wieder: Im Merkblatt DWA-M 119 „Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge“ (DWA 2016) wird in Abgrenzung zur Überflutungsgefahr für das Auftreten einer Überflutungsgefährdung ebenfalls die Exposition eines Risikoobjekts¹ und dessen mögliche Schadensbetroffenheit vorausgesetzt. Die in Tabelle 2-1 geführten Begriffsdefinitionen nach DWA-M 119 sollen auch im Rahmen dieser Arbeit gelten.

Tabelle 2-1: Begriffsdefinitionen Gefahr und Gefährdung

Begriff	Definition	Quelle
Überflutungsgefahr	<i>Auftreten und Ausmaß möglicher Überflutungen aufgrund eines Starkregenereignisses, z. B. in einer Gefahrenkarte dargestellt als auftretende Wasserstände und/oder Fließgeschwindigkeiten</i>	(DWA 2016)
Überflutungsgefährdung	<i>Auftreten und Ausmaß möglicher Überflutungen durch Lokalisierung der Überflutungsgefahr mit Bewertung, inwieweit Objekte, z. B. Gebäude, betroffen sind, gegebenenfalls unter Einbeziehung der Häufigkeit („Wahrscheinlichkeit“) des Auftretens bestimmter Überflutungsgefahren (Exposition)</i>	(DWA 2016)
	<i>Eine durch Einbeziehung der Auftretenshäufigkeit („Wahrscheinlichkeit“) und Beschreibung ihres Ausmaßes näher bestimmte Überflutungsgefahr mit potenziell schädigender Wirkung auf davon betroffene (exponierte) Objekte, z. B. Gebäude</i>	<i>./. (eigene Definition in Anlehnung an Birkmann et al. 2013; Lenz 2009)</i>

¹ In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff „Risikoobjekt“ äquivalent zu dem international gebräuchlichen „*element at risk*“ als Überbegriff für verschiedenste Objekte und Bauwerke verwendet. DWA-M 119 meint mit dem Begriff Baulichkeiten mit einer gesonderten Risikobedeutung, z. B. Zugänge zu unterirdischen baulichen Anlagen oder Anlagen Kritischer Infrastrukturen.

In der kommunalen Überflutungsvorsorge steht der Begriff der „Gefährdung“ aufgrund der zumindest qualitativen Determinierbarkeit bei Starkregenabflüssen im Vordergrund. Es wird demnach methodisch von der **Gefährdungsanalyse** gesprochen (vgl. DWA 2013b, 2016). Der Gefährdungsgrad von Überflutungen infolge Starkregens oder Sturzfluten hängt zum einen von der Intensität und zum anderen von der Eintrittswahrscheinlichkeit der gefahrenauslösenden Prozesse ab (vgl. DKKV 2003). Die Intensität der Gefährdung wird durch verschiedene Indikatoren, wie z. B. die räumliche Ausdehnung und Höhe der Überflutung, die Fließgeschwindigkeit, die Art und Menge der mitgeführten Feststoffe und die Vorwarnzeit beschrieben (Tabelle 2-2). Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Starkregenüberflutung wird durch statistische Wiederkehrzeiten angegeben (BMBF 2008). Mit steigender Intensität und Eintrittswahrscheinlichkeit eines Starkregenereignisses nimmt auch die Gefährdung zu, unmittelbar oder indirekt von dessen negativen Auswirkungen betroffen zu sein.

Tabelle 2-2: Schadensbeeinflussende Gefährdungsparameter für Starkregenüberflutungen (verändert nach Merz et al. 2010; Hatzfeld und Kurz 2010)

Gefährdungsparameter	Erläuterung
Überflutungstiefe	Mit ansteigender Überflutungstiefe nimmt die Wahrscheinlichkeit eines Wassereintritts in ein Gebäude zu (höhere Wasserdrücke und Nässeeinwirkungen auf Fassade und Gebäudeöffnungen, potenziell längere Expositionsphase, potenziell größeres Überflutungsausmaß bei Wassereintritt); erhöhte Auftriebsgefahr für mobile Gegenstände & Gebäude
Fließgeschwindigkeit	Höhere Fließgeschwindigkeiten bedingen größere dynamische Wasserdruck- und Aufpralleinwirkungen (Treibgut) auf Gebäude, zunehmende Gefahr für Unterspülungen, Erosion und das Mitreißen mobile Gegenstände oder Personen
Überflutungsdauer	Längere Expositions- und Einwirkungsphasen auf Gebäudestruktur und -öffnungen bzw. Sachgüter bei Wassereintritt
Verschmutzung/ Kontamination	Mit Verschmutzungsgrad des Wassers zunehmende Reinigungs- und Regenerationskosten, mitunter irreversible Schädigungen und Totalverlust von Gebäuden (Heiz- und Mineralölkontaminationen, Verschlämmung poröser Materialien, Schimmel und Krankheitserreger)
Schutt, Treibgut und Sedimente	Größere Schäden an Gebäuden und Tragkonstruktionen durch Anprall von Treibgut, hohe Geröll- und Sedimentanteile verstärken Schadensausmaß insbesondere an technischen Einrichtungen und verursachen erhebliche Erschwernisse bei der Schadensbeseitigung und -räumung
Überflutungsintervall	Einerseits Vergrößerung des Schadensausmaßes bei erneuten Überflutungen aufgrund kumulativer Effekte (z. B. bei noch nicht abgeschlossener/unvollständiger Regeneration), andererseits Verringerung des Schadensausmaßes möglich durch bessere Vorbereitung und Bewältigungsroutine
Überflutungszeit, Vorwarnzeiten	Kurze oder fehlende Vorwarnzeiten sowie ungünstige Ereigniszeitpunkte (Nachtzeiten, Abwesenheiten) reduzieren die Handlungsoptionen zur Gefahrenabwehr und akuten Bewältigung, was potenziell größere Schadensausmaße ermöglicht

Nicht alle der in Tabelle 2-2 gelisteten Gefährdungsparameter lassen sich methodisch im Rahmen einer Gefährdungsanalyse quantifizieren. Bei der gekoppelten 1D/2D-Simulation (siehe Tabelle 2-7, S. 38) als detaillierteste Methode sind es die Wassertiefe, die Fließgeschwindigkeit und die Überflutungsdauer. Bei der topografischen Gefährdungsanalyse hingegen beschränkt sich die Quantifizierung auf die maximal mögliche Überflutungstiefe im Bereich von Senken. Auch sind hier die Möglichkeiten zur näheren Bestimmung von Überflutungsgefahren durch das Fehlen der lastfallbezogenen Größen Überflutungstiefe und Fließgeschwindigkeit stark eingeschränkt. Das an Eintrittswahrscheinlichkeiten gekoppelte räumlich-zeitliche Ausmaß einer Überflutung kann nur abgeschätzt werden. Damit beschränkt sich für diesen Anwendungsfall die Überflutungsgefährdung auf eine Gefahrensituation für ein oder mehrere exponierte Risikoobjekte, zu deren Beschreibung Ersatzparameter als Gefährdungsindikatoren heranzuziehen sind (siehe Abschnitt 4.2.1).

2.1.2 Vulnerabilität

2.1.2.1 Definitionen und Allgemeines

Das bei einer Sturzflut oder Starkregenüberflutung zu erwartende Schadensausmaß wird maßgeblich von der **Vulnerabilität** (*vulnerability*) der innerhalb des Untersuchungsraums betroffenen Risikoobjekte bestimmt. Abgesehen von der wörtlichen Begriffsübersetzung als „Verwundbarkeit“ oder „Verletzbarkeit“ ist die Vulnerabilität ein inhaltlich weiter gefasstes, theoretisches Konstrukt für ein komplexes, nicht direkt beobachtbares oder gar messbares Phänomen (Lenz 2009). Es existieren in den verschiedenen Forschungsbereichen zahlreiche, teils sehr unterschiedliche Verständnisweisen, Konzepte und Definitionen (vgl. Thywissen 2006; Messner und Meyer 2007; Hufschmidt 2011), auch, weil sich Vulnerabilität auf verschiedene Skalen und Betrachtungsebenen (Individuum – Gesellschaft, Einzelobjekte – Stadtquartiere, Infrastruktursektoren, Kommunen, Regionen, Staaten) beziehen kann.

Es kann grob in eine natur- und ingenieurwissenschaftliche sowie eine sozialwissenschaftliche Untersuchungsperspektive („Denkschule“) der Vulnerabilität unterschieden werden (Glade 2003). Da die Auseinandersetzung mit Vulnerabilität in der Regel über interdisziplinäre Dialoge und Entscheidungsprozesse zwischen den beteiligten Disziplinen erfolgen muss, werden das Problemverständnis und die Zusammenarbeit durch die Definitionsvielfalt erschwert und Missverständnisse begünstigt. Es ist daher stets erforderlich, sich bei der Diskussion und Kommunikation von Vulnerabilität möglichst früh auf eine für den jeweiligen Anwendungskontext gültige Bedeutung zu verständigen.

Für die vorliegend behandelten Starkregenüberflutungen werden die für Naturgefahren und den Klimawandel gebräuchlichen Vulnerabilitätsdefinitionen der Naturrisikoforschung als geeignet herangezogen. Auf internationaler Ebene wurden diese

von der International Strategy for Disaster Reduction der Vereinten Nationen (UNISDR) bzw. dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) formuliert. Ihr Wortlaut ist neben einer Übersetzung Tabelle 2-3 zu entnehmen. Ergänzt wird die Zusammenstellung um eine nationale Vulnerabilitätsdefinition nach Lenz (2009), die sich gesondert auf den eminenten Anwendungskontext Kritische Infrastrukturen bezieht und von den beiden vorgenannten Definitionen konzeptionell unterscheidet.

Tabelle 2-3: Relevante Begriffsdefinitionen Vulnerabilität

Anwendungskontext Naturgefahren und -risiken

Vulnerability: The conditions determined by physical, social, economic, and environmental factors or processes, which increase the susceptibility of a community to the impact of hazards.
(UNISDR 2004a)

Vulnerabilität: Durch physische, soziale, ökonomische und ökologische Faktoren und Prozesse determinierte Bedingungen, die die Anfälligkeit einer Gemeinschaft gegenüber den Auswirkungen von Naturgefahren erhöhen.
(Birkmann et al. 2011)

Anwendungskontext Klimawandel

The degree to which a system is susceptible to, or unable to cope with, adverse effects of climate change, including climate variability and extremes.

Vulnerability is a function of the character, magnitude, and rate of climate variation to which a system is exposed, its sensitivity, and its adaptive capacity.
(IPCC 2001)

Das Ausmaß, zu welchem ein System oder ein Akteur anfällig ist gegenüber nachteiligen Auswirkungen des Klimawandels, einschließlich der Klimavariabilität und der Extrema, oder unfähig ist, diese zu bewältigen.

Die Vulnerabilität ist abhängig von der Art, dem Ausmaß, der Geschwindigkeit und der Schwankungsbreite der Klimaänderung, welcher das System ausgesetzt ist, sowie der Empfindlichkeit und der Anpassungskapazität des Systems oder des Akteurs. (Die Bundesregierung 2011)

Anwendungskontext Kritische Infrastrukturen

./.

Die gefahrenspezifische Anfälligkeit einer Kritischen Infrastruktur für Beeinträchtigung oder Ausfall ihrer Funktionsfähigkeit, welche zur Unterbrechung der Versorgung der Bevölkerung mit wichtigen Gütern und Diensten führen können. (Lenz 2009)

Im Kontext der Naturrisikoforschung ist die von der International Strategy for Disaster Reduction der Vereinten Nationen (UNISDR) formulierte Definition von Vulnerabilität weit verbreitet und allgemein gültig. Sie zielt auf determinierte Bedingungen ab, bringt insbesondere die unterschiedlichen Wirkungsebenen und -dimensionen der Vulnerabilität zum Ausdruck und verdeutlicht, dass Vulnerabilität ein mehrdimensionaler Begriff ist (siehe Tabelle 2-4). Die Dimensionen beziehen sich sowohl auf eine Gemeinschaft als auch auf die individuelle Vulnerabilität eines oder mehrerer

Risikoobjekte. Darüber hinaus lassen sie sich nicht immer klar voneinander abgrenzen, beispielsweise wenn erhebliche Sachschäden sowohl als Indiz für die physische als auch für die ökonomische Vulnerabilität eines Objekts angesehen werden. Es können ferner gegenseitige Wechselwirkungen und Beeinflussungen zwischen den Vulnerabilitätsdimensionen einzelner Risikoobjekte bestehen. Wird z. B. ein bedeutender Industriebetrieb als Risikoobjekt von einer Starkregenüberflutung oder einem Hochwasserereignis bedroht, so ist neben seiner unmittelbaren physischen Vulnerabilität (infolge der leiblichen Gefährdung anwesender Belegschaft, potenzielle Sachschäden) auch seine ökonomische Vulnerabilität (Störungen oder Ausfall der Produktion) risikobestimmend. Darüber hinaus kann es jedoch auch erforderlich sein, ökologische Vulnerabilitäten für weitere Risikoobjekte in die Risikobewertung einzubeziehen, wenn im Überflutungsfall etwaige umweltgefährdende Stoffe freigesetzt und Boden und Gewässer kontaminiert werden. Die 2011 durch einen Tsunami ausgelöste Nuklearkatastrophe in Fukushima sei als weiteres Beispiel für die mehrdimensionale Ausprägung von Vulnerabilität, hier des Risikoobjekts „Kernkraftwerk“, angeführt, das aufgrund seiner dramatischen Folgen keiner näheren Erläuterung bedarf.

Tabelle 2-4: Dimensionen der Vulnerabilität gemäß Definition nach UNISDR (2004a)

Dimension	Erläuterung
<i>Physische Dimension</i>	<i>Sie bezieht sich auf das körperliche Wohlergehen des Menschen, dessen Gesundheit und Unversehrtheit (Stichwort „Leib und Leben“), aber auch auf materielle Sachwerte</i>
<i>Soziale bzw. soziokulturelle Dimension</i>	<i>Sie betrifft das Wohlergehen sowohl des einzelnen Menschen innerhalb der Gesellschaft als auch die Gesellschaft selbst. Hierunter fallen insbesondere auch kulturelle Aspekte, wie Bildungs-, Informations- und Kommunikationsstandards, Kultur- und Freizeitgüter.</i>
<i>Ökonomische Dimension</i>	<i>Sie bezieht sich auf alle wirtschaftlichen Bereiche und Tätigkeiten von Privatpersonen, Gewerbe- und Industrieunternehmen, Kommunen und Volkswirtschaften</i>
<i>Ökologische Dimension</i>	<i>Sie bezieht sich auf die Natur und Umwelt als menschliche Lebensgrundlage und deren biotische und abiotische Bestandteile und Güter (Flora, Fauna, Ressourcen, Wasser, Klima, etc.); nach Lenz (2009) auch „natürliche Dimension“ genannt</i>

Im sozialwissenschaftlichen Kontext, der hier nicht vertieft werden soll, steht demgegenüber die gesellschaftliche Vulnerabilität im Vordergrund, meist in Verbindung mit der Entstehung und dem Auftreten von Katastrophen.

Auch bei raumplanerischen Fragestellungen geht es vorrangig um die Vulnerabilitätsbewertung eines Gesamtsystems oder Planungsraums. Dies führt zu einer etwas anderen Unterteilung der Vulnerabilität (vgl. Bürkner 2010; Birkmann 2008). Im Ge-

gensatz zu Tabelle 2-4 wird die physische Dimension nicht geführt, dafür Sach- und Objektschäden der ökonomischen Dimension zugeordnet. Der Bereich Kritische Infrastrukturen wird in der Raumplanung ebenfalls vorrangig der ökonomischen Vulnerabilitätsdimension zugeordnet, kann jedoch auch als gesonderte Dimension geführt werden. Die soziale Dimension wird weiter gefasst, indem sie die Aspekte Wohnen und Gesundheit der Bevölkerung mit einschließt. Die ökologische, umweltbezogene Dimension der Vulnerabilität wird vergleichbar zu Tabelle 2-4 definiert, während eine gesonderte vierte, die institutionelle Dimension für die Vulnerabilität der Raumplanung selbst und ihrer Instrumente geführt wird. Konkret geht es z. B. um Fragestellungen, wie vulnerabel sich kommunale Planungsergebnisse, der Katastrophenschutz, Kommunikations- und Abstimmungsstrukturen für die Phasen der Prävention, Vorsorge und Bewältigung im Ereignisfall zeigen (Birkmann 2008).

Aufgrund der aufgezeigten Vielschichtigkeit und Komplexität ist Vulnerabilität schwer konkret zu fassen und zu quantifizieren. Die alleinige Reduktion von Vulnerabilität auf die Schadensanfälligkeit eines Risikoobjekts ist unzureichend, weil damit eine nur sehr eingeschränkte Bewertung anhand der nachteiligen Auswirkungen auf Räume, Systeme oder Personen erfolgt (Birkmann et al. 2011). Es ist vielmehr bedeutsam, dass zur Bewertung der Vulnerabilität auch die Handlungsoptionen und Kapazitäten zur Bewältigung und Anpassung herangezogen werden. Dies bringt die zweite, oben angeführte Vulnerabilitätsdefinition des IPCC zum Ausdruck, die mit der **Exposition**, der **Empfindlichkeit bzw. Anfälligkeit** und der **Anpassungskapazität** die beeinflussenden Komponenten der Vulnerabilität, hier bezogen auf den Klimawandel, explizit benennt und aufgreift (siehe auch Buth et al. 2015 bzw. Abbildung 2-1).

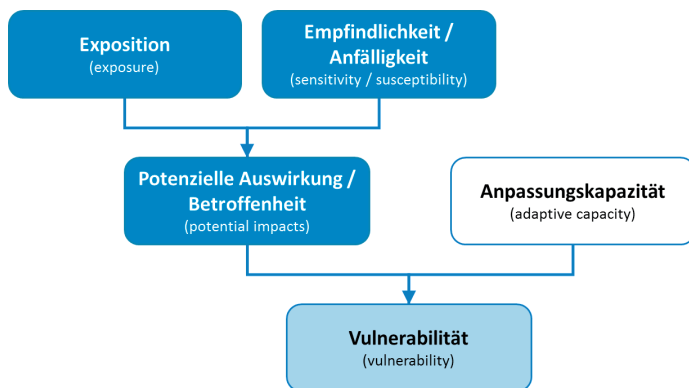


Abbildung 2-1: Das IPCC-Vulnerabilitätskonzept (verändert nach IPCC 2007)

Das IPCC-Vulnerabilitätskonzept orientiert sich damit an dem u. a. von White et al. (2005) formulierten Vulnerabilitätskonzept, das von Taubenböck (2007) gemäß Gleichung (1) mathematisch ausgedrückt wird.

$$V = \frac{\text{Gefährdungsgrad} \cdot \text{Sensitivität}}{\text{Bewältigungspotenzial}} \quad (1)$$

Mit engerem begrifflichem Bezug zur IPCC-Definition wird bei methodischen Ansätzen der Vulnerabilitätsanalyse mit Ermittlung von „Vulnerabilitätsindices“ (siehe Abschnitt 2.3.2) zudem häufig Gleichung (2) angewendet. Die Vulnerabilität V wird darin als Produkt von Exposition E und Anfälligkeit S , dividiert durch die Resilienz R ausgedrückt (siehe dazu z. B. Balica et al. 2009; Balica et al. 2012; Villordon und Gourbesville 2014). Auf die Resilienz wird gesondert in Abschnitt 2.1.2.5 eingegangen. Ihre Verwendung als Komponente der Vulnerabilität anstelle der Anpassungskapazität ist jedoch umstritten, weil sie der Vorstellung eines übergeordneten Gestaltungsleitbildes widerspricht (vgl. Gleich et al. 2010).

$$V = \frac{E \cdot S}{R} \quad (2)$$

Die Denkschule der Naturrisikoforschung orientiert sich ebenfalls an dem Begriffsverständnis des IPCC, ist jedoch stärker auf gefährdungsverursachende Extremereignisse fokussiert. Aus diesem Grund führt sie anstelle der eher langfristig und strategisch ausgerichteten Anpassungskapazität die stärker ereignisbezogene **Bewältigungskapazität** (*coping capacity*) als dritte Komponente neben Exposition und Anfälligkeit (vgl. Birkmann et al. 2013; BBK 2013). Auf die Unterschiede von Anpassungs- und Bewältigungskapazität wird gesondert in Abschnitt 2.1.2.4 eingegangen.

Vulnerabilität kann jedoch auch enger gefasst werden. Lenz (2009) sieht in der Exposition eine eigenständige Risikokomponente und definiert die Vulnerabilität eines Risikoobjekts (hier: Kritische Infrastrukturen) primär über dessen Anfälligkeit für Beeinträchtigungen (Schäden, Funktionsausfall, etc.). Nach diesem Verständnis ist die Vulnerabilität eines Risikoelements immanent vorhanden, d. h. sie besteht immer und unabhängig von der Exposition. Lenz (2009) nennt noch weitere Charakteristika von Vulnerabilität: Sie ist objektbezogen, also stets in Bezug auf die spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Risikoobjekts zu sehen. Sie ist zudem skalenbezogen zu bewerten, d. h. sie wird je nach räumlicher Bewertungsskala von unterschiedlichen Einflussfaktoren bestimmt (vgl. Barroca et al. 2006). Da sie sich immer in den schädigenden Auswirkungen eines konkreten Ereignisses manifestiert, ist sie auch gefahrrenspezifisch, also abhängig von dem Gefährdungsausmaß. Demgegenüber kann sie sich zeitlich dynamisch verändern und durch die Anpassungsfähigkeit des Risikoobjekts vermindern, indem z. B. Schutzvorkehrungen getroffen werden.

Die genannten Vulnerabilitätskomponenten werden nachfolgend kurz und bei Bedarf differenziert nach den jeweiligen Denkweisen beschrieben und erläutert.

2.1.2.2 Exposition

Unter **Exposition** (*exposure*) versteht man in der Naturrisikoforschung das zeitliche und räumliche Ausgesetztsein eines Risikoelements (Schutzgut, Objekt, Subjekt, System) gegenüber gefährlichen Prozessen. Darunter fallen sowohl konkrete Gefährdungen (z. B. Überflutungsereignisse einer bestimmten statistischen Eintrittshäufigkeit) als auch potenziell negative Einwirkungen und Effekte des Klimawandels (vgl. Birkmann et al. 2013).

Je nach Sichtweise wird die Exposition als Komponente der Vulnerabilität (u. a. Birkmann et al. 2013; Buth et al. 2015) oder eigenständige Risikokomponente angesehen (Lenz 2009). Während sich über das „Ausgesetztsein“ eine eher passive Objekteigenschaft ausdrückt, versteht das im Kontext Klimawandel geltende Vulnerabilitätskonzept (IPCC 2012) unter der Exposition Elemente des Klimawandels (z. B. steigende Temperaturen, Veränderungen von Niederschlägen oder Wetterextremen), die als aktive, systemische Reize oder Klimasignale innerhalb eines bestehenden Systems eine Veränderung (*potential impact*) hervorrufen (Buth et al. 2015).

Die Exposition wird jedoch abseits der Vulnerabilität auch zu Differenzierung von Gefahr und Gefährdung herangezogen (siehe Abschnitt 2.1.1). Nach Lenz (2009) entwickelt sich erst mit Vorhandensein der Exposition aus der Gefahr eine konkrete Gefährdung für das Risikoobjekt. Diese Interpretation findet sich auch in der begrifflichen Differenzierung von Überflutungsgefahr und -gefährdung (s.o.) nach Merkblatt DWA-M 119 wieder (vgl. DWA 2016).

Die Rolle der Exposition innerhalb der Gesamtrisikodefinition ist somit nicht eindeutig. Sie fungiert als Bindeglied zwischen der räumlich-zeitlichen Ausprägung der Gefahr einerseits und der Objektvulnerabilität andererseits. Ihre verbindende Funktion findet auch in der methodischen Umsetzung der topografischen Gefährdungs- und Risikoanalyse gesonderte Berücksichtigung (siehe Abschnitt 4.4).

2.1.2.3 Anfälligkeit

Bei der Charakterisierung der Vulnerabilität kommt der **Anfälligkeit** (*susceptibility*) eines Risikoobjektes eine herausragende Bedeutung zu. Sie wird in der einfachsten, allgemeinen Definition von Vulnerabilität auch als deren Synonym verwendet. Je nach Wissenschaftsdisziplin und Anwendungskontext sind anstelle von Anfälligkeit auch die Begriffe „Empfindlichkeit“ oder „Sensitivität“ (*sensitivity*) zu finden. Die Anfälligkeit bestimmt, wie rasch, lange und umfanglich ein Risikoobjekt oder System von spezifischen Gefahren bzw. äußeren Einwirkungen und Reizen (Exposition, s. o.) in seinem Zustand oder seiner Funktion (negativ) beeinträchtigt wird. Demnach ist die Anfälligkeit als Gegenteil der Widerstandsfähigkeit eines Risikoobjektes anzusehen. Diese wiederum lässt sich über die zwei Objekteigenschaften Robustheit und Pufferkapazität beurteilen.

In Anlehnung an die von Lenz (2009) für Kritische Infrastrukturen formulierten Definitionen ist die Robustheit oder Resistenz eines Objekts ein relatives Maß für dessen Fähigkeit, der physischen Einwirkung eines Ereignisses widerstehen zu können und somit durch dieses nicht beschädigt oder in seiner Funktionsfähigkeit beeinträchtigt zu werden. Die Robustheit bestimmt somit, ob und ab welcher Gefährdungsintensität es zu einer Beeinträchtigung oder einem Schaden kommt. Eng damit verknüpft gilt die Pufferkapazität als relatives Maß für die Fähigkeit eines Risikoobjekts, möglichst lange die negativen Einwirkungen „abzupuffern“, d. h. die schädlichen Konsequenzen zu verhindern. Die Anfälligkeit resultiert somit unmittelbar aus den Defiziten an Robustheit und Pufferkapazität des Risikoobjekts.

Die Zusammenhänge werden vereinfacht anhand des Denkmodells in Abbildung 2-2 erläutert. Interpretiert man ein Gefährdungsereignis modellhaft als Kennfeld, dessen Dauer über eine Zeitachse und Stärke über eine Intensitätsachse aufgespannt wird, so definieren analog Pufferkapazität und Robustheit des exponierten Risikoobjekts ein Kennfeld der Widerstandsfähigkeit, das der Gefährdung entgegen wirkt. Mitunter erfolgt der Verlust der Pufferkapazität eines Risikoobjekts nicht unmittelbar, sondern kontinuierlich oder stufenweise. Dies ist häufig bei Funktionsanfälligkeiten zu beobachten, beispielsweise, wenn bei einem Überflutungsereignis nacheinander einzelne Pumpen eines Abwasserpumpwerks ausfallen oder abzuschalten sind. Vereinfacht ist dieser Effekt als Abschrägung des Widerstandskennfeldes visualisiert. Außerhalb des Widerstandskennfeldes kommt die Anfälligkeit zum Tragen. Für die drei exemplarisch dargestellten Gefährdungsereignisse A bis C fällt diese unterschiedlich aus: Die Gefährdung A ist zu schwach und zu kurz wirksam, um die Widerstandsfähigkeit zu überwinden (keine Anfälligkeit). Für die Gefährdung B liegt eine zeitlich verzögerte Anfälligkeit vor, weil die Expositionsdauer die Pufferkapazität überschreitet, obwohl die Robustheit ausreichend wäre. Die Gefährdung C hingegen ist derart stark ausgeprägt, dass es bereits mit Expositionsbeginn zu einer Anfälligkeit des Risikoobjekts und Schadenswirkung kommt.

Mit dem Verständnis von Schäden als dem Verlust von Werten einerseits und von Funktionsfähigkeit andererseits ist es zudem hilfreich, in Schadensanfälligkeit und Funktionsanfälligkeit zu unterscheiden (Birkmann et al. 2011). In vielen Fällen kommt eher die Funktionsanfälligkeit zum Tragen als die Schadensanfälligkeit, etwa wenn im Falle eines Überflutungs- oder Hochwasserereignisses präventiv Komponenten zur Stromversorgung außer Betrieb genommen werden, (lange) bevor diese Komponente beschädigt wird, also ihre Schadensanfälligkeit relevant wird. Das genannte Beispiel verdeutlicht zudem, dass beide Anfälligkeitsarten fallspezifisch unterschiedlich zu bewerten sind.

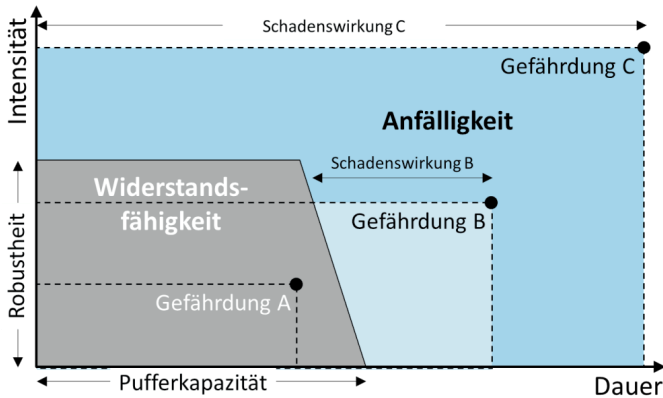


Abbildung 2-2: Denkmodell zur Beschreibung der Objektfähigkeit für verschiedene Gefährdungen (eigene Darstellung)

2.1.2.4 Bewältigungskapazität und Anpassungskapazität

Die **Bewältigungskapazität** (*coping capacity*) beschreibt das Vermögen von Risikoobjekten (Individuen oder Systeme), vorhandene Ressourcen und Fähigkeiten zu nutzen, um erlittene Beeinträchtigungen, Nutzungseinschränkungen und Schäden zu mindern oder auszugleichen und die uneingeschränkte Funktionalität bzw. den Ausgangszustand des Systems wieder herzustellen (vgl. UNISDR 2004a). Nach (UNISDR 2004a) kann sie als Maß für die unterschiedlichsten Leistungen zur Verringerung der potenziellen Vulnerabilität definiert werden und repräsentiert die gesamte zeitliche Dimension der Wiederherstellung des Normalzustands eines Systems mit Bezug auf direkte Maßnahmen vor, während oder nach einem Schadensereignis.

Je nach Auslegung des Vulnerabilitätsbegriffs wird die Bewältigungskapazität statt als Vulnerabilitätskomponente auch als eigenständige Risikokomponente oder als Komponente des Schadensausmaßes angesehen. Lenz (2009) schlägt insbesondere für den Bereich Kritischer Infrastrukturen die Bewältigungskapazität als eine weitere Risikokomponente neben der Vulnerabilität vor (siehe Abschnitt 2.2). Damit wird die für diesen Anwendungskontext hervorgehobene Bedeutung der Bewältigungskapazität betont, da wesentliche gesellschaftliche oder wirtschaftliche Prozesse von der Funktionalität Kritischer Infrastrukturen, bspw. der Trinkwasserversorgung, Energieversorgung oder Telekommunikation, abhängen.

Wird die Vulnerabilität als Risikokomponente begrifflich enger gefasst und wie auch das Risiko auf das Eintreten eines Schadensereignisses bezogen, so muss die Bewältigungskapazität losgelöst von Vulnerabilität und Risiko gesehen werden, da sie in zeitlicher Einordnung erst nach dem Schadenseintritt wirksam wird.

In begrifflicher Abgrenzung zur Bewältigungskapazität versteht man unter **Anpassungskapazität** (*adaptive capacity, adaptation capacity*) die mittel- bis langfristige Reduzierung der Vulnerabilität durch eine Umstellung und Neuausrichtung eines Systems auf veränderte Randbedingungen (Umwelt, Gesellschaft) als einen strategischen Prozess (vgl. Birkmann et al. 2011). Sie reduziert damit präventiv und ohne Bezug auf ein eingetretenes Schadensereignis die Vulnerabilität eines Risikoobjekts und wird häufig auch in Verbindung mit Resilienz genannt.

2.1.2.5 Resilienz

Im Zusammenhang mit der Vulnerabilität findet in der Regel auch der Begriff **Resilienz** (*resilience*) breite Anwendung. Auch hierzu ist eine erhebliche Vielfalt an Definitionen und unterschiedlichen Denkschulen anzutreffen (vgl. Thywissen 2006; Birkmann 2008). Die ursprünglich für Ökosysteme formulierte Definition nach Holling (1973) beschreibt deren Fähigkeit, angesichts unvorhersehbarer Änderungen (Schocks oder Stresssituationen) zu überleben, sich daran anzupassen und/oder gar sich weiterzuentwickeln. Längst wird der Resilienzbegriff auch auf viele andere Bereiche angewendet. So werden z. B. soziale, sozio-ökologische oder sozio-ökonomische Systeme, aber auch ingenieurtechnische Systeme bzgl. ihrer Resilienz analysiert und beurteilt.

Da der vorliegende Arbeitskontext nicht das technische Entwässerungssystem und dessen Resilienz fokussiert, soll die von Birkmann (2008) formulierte Definition gelten, die sich auf Naturgefahren als unvorhersehbare Systemeintrwirkung bezieht.

Resilienz beschreibt „Eigenschaften oder Kapazitäten eines (...) Systems, die es ermöglichen, dass dieses System unter Schocks, z. B. den Einwirkungen von Naturgefahren (...) wesentliche Funktionen aufrechterhält oder Unterbrechungen der Systemabläufe bzw. Funktionen sehr schnell nach dem Ereignis wieder schließen kann“ (Birkmann 2008).

In dieser Definition vereinigen sich die vorgenannten Eigenschaften Robustheit bzw. Pufferkapazität, Bewältigungs- und Anpassungskapazität. Der Resilienzbegriff geht über die reine Bewältigungskapazität hinaus (Thywissen 2006). Resiliente Systeme lassen sich mit Attributen wie „belastbar“, „widerstandsfähig“, „robust“, „regenerationsfähig“, „anpassungs- und lernfähig“ charakterisieren (vgl. Djordjević et al. 2011). Je nach Herausforderung und Art der Störung müssen resiliente Systeme unterschiedliche, teils nicht miteinander vereinbare Fähigkeiten zeigen (Tabelle 2-5).

Tabelle 2-5: Fähigkeiten eines resilienten Systems in Bezug auf unterschiedliche Herausforderungen (Gleich et al. 2013)

Herausforderung	bekannt	unbekannt
langsam/ schleichend	Anpassungsfähigkeit	Innovationsfähigkeit
schnell/ abrupt	Widerstandsfähigkeit	Improvisationsfähigkeit

Resilienz hat auch im Bereich der Naturgefahren- und Katastrophenvorsorge einen fundamentalen Stellenwert. Als zentrales und international gültiges Leitbild für eine Entwicklung hin zu einer zukünftig katastrophenresilienten Gesellschaft („*disaster resilient society*“, siehe UNISDR 2005; Die Bundesregierung 2015) wird es insbesondere als Antwort auf die Herausforderungen des Klimawandels thematisiert. Damit ist u.a. auch die nachdrückliche Forderung nach integralen, disziplinübergreifenden Handlungsansätzen und Strategien zur Resilienzsteigerung von Siedlungen gegenüber Hochwasser und Starkregenüberflutungen verbunden (siehe u. a. Kluck et al. 2010; Djordjević et al. 2011; Schelfaut et al. 2011; Fratini et al. 2012; Leandro et al. 2012). In diesen Zielkontext lässt sich auf politischer Ebene auch die Hochwasserrisikomanagementrichtlinie der Europäischen Union (HWRM-RL 2007) einordnen (Schelfaut et al. 2011).

Im Anwendungskontext Klimawandel, Naturgefahren- und Katastrophenvorsorge wird Resilienz häufig als komplementäre Größe und Gegenbegriff zur Vulnerabilität verstanden (u.a. IPCC 2001; Marg 2016). Die enge Verknüpfung der beiden Begriffe als gegensätzliche Reaktionseigenschaften eines Systems auf äußere Störungen erlaubt es auch in sehr vielen Fällen, anhand einer hohen Vulnerabilität auf eine entsprechend geringe Systemresilienz zu schlussfolgern und umgekehrt resilienten Systemen eine geringe Vulnerabilität zuzusprechen.

Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass diese Interpretation nicht allgemeiner Konsens ist. Gleich et al. (2010) differenzieren und betonen, dass Resilienz als Gestaltungsleitbild („Leitkonzept“) und Vulnerabilität als „analytische Kategorie“ unterschiedliche Systemaspekte darstellen, die nicht gemeinsam und einheitlich operationalisierbar sind. Für die Autoren bedeutet dies, dass Maßnahmen, die zur Verringerung der Vulnerabilität ergriffen werden, nicht zwangsläufig auch eine Resilienzsteigerung bewirken bzw. dass sich daraus sogar ein Zielkonflikt ergeben kann. Die Operationalisierbarkeit, d. h. die Überführung eines solchen Resilienzleitbildes in ein Risikomanagementkonzept mit konkreten Maßnahmen wird durch die vorherrschende Definitionsvielfalt, durch Kenntnisdefizite und Unsicherheiten von Entscheidungsträgern und Stakeholdern sowie durch Schwierigkeiten bei der Quantifizierung der Resilienz erheblich erschwert (Schelfaut et al. 2011). Dennoch existieren verschiedene indikatorbasierte Ansätze der Resilienzbewertung, auch im Bereich des Hochwasserschutzes (siehe Abschnitt 2.3.2.1).

Parallel zur Resilienz als übergeordnetem Gestaltungsleitbild sind in engerem Bezug auf technische Systeme und deren Leistungsfähigkeit unter Störungseinfluss auch konkrete Methoden zur Operationalisierung und Bewertung der Resilienz gefragt. Mit Bezug auf urbane Abwassersysteme werden von Juan-García et al. (2017) vier wesentliche Elemente zur Beschreibung der Systemresilienz identifiziert: Die systemstörende Einwirkung („*stressor*“), die Systemeigenschaften („*properties*“), Quantifizierungsgrößen („*metrics*“) zur Bewertung der Systemleistung vor, während und nach der Störeinwirkung sowie die Möglichkeiten der Einflussnahme („*interventions*“) zur Resilienzsteigerung bzw. zu deren Benchmarking (Juan-García et al. 2017). Die von

den Autoren durchgeführte Literaturstudie zur Resilienz urbaner Abwassersysteme belegt zum einen die selbst für einen solch engen Systembezug vorhandene Definitionsvielfalt. Sie verdeutlicht zum anderen aber auch anhand einer nur geringen Anzahl an Publikationen (z. B. Mugume et al. 2015; Matzinger et al. 2018), dass Ansätze zur qualitativen oder gar quantitativen Resilienzbewertung auf Systemebene derzeit noch die Ausnahme sind (siehe auch Balsells et al. 2015).

2.1.3 Schaden und Schadenspotenzial

2.1.3.1 Definitionen

Unter **Schaden** (*harm, damage*) wird allgemein „die Zerstörung und Minderung von konkreten oder abstrakten Werten“ (Birkmann et al. 2013) bzw. „ein Nachteil durch Minderung oder Verlust an materiellen oder immateriellen Gütern“ (Berg et al. 1994) verstanden. Unter Bezug auf die schadensauslösenden Prozesse definiert die Risikokommission (2003) Schäden als „negativ bewertete Folgen eines Ereignisses oder einer Handlung“, woraus deutlich wird, dass der Schadensbegriff stets ein Resultat subjektiver Wertung und anthropozentrisch angelegt ist (WBGU 1999). Zum einen werden betroffene Risikoobjekte als „Werte“ und Schutzgüter mit entsprechendem Schutzbedarf festgelegt, zum anderen werden die betreffenden Ereignis- oder Handlungsfolgen als schädliche Prozesse (Gefahren) eingestuft.

Die Begriffe „Schaden“ und „Vulnerabilität“ sind eng miteinander verknüpft, wie sich an den oben diskutierten Vulnerabilitätskomponenten (u. a. Anfälligkeit) gezeigt hat. Dennoch bedarf es einer begrifflichen Abgrenzung. Ein Schaden wird immer durch ein konkretes Einzelereignis einer definierten Gefährdungsausprägung ausgelöst und hervorgerufen. Wird die Vulnerabilität ebenfalls auf diesen Ereignislastfall bezogen, ist der **Schaden bzw. das Schadensausmaß als Resultat oder Symptom der Vulnerabilität** des geschädigten Risikoobjekts oder Systems zu verstehen. Die Vulnerabilität kann jedoch auch ereignisübergreifend als allgemein gültiges Charakteristikum eines Risikoobjekts für die „Verletzlichkeit“ und die Gesamtheit an möglichen Schadensausprägungen aufgefasst werden. In diesem Fall ist das bei einem einzelnen Ereignis auftretende Schadensausmaß lediglich als fallspezifischer Indikator der Vulnerabilität zu verstehen, der diese jedoch nicht hinreichend beschreiben kann.

Auch wenn bei der Bewertung von Hochwasser- und Starkregenüberflutungsrisiken den konkret aufgetretenen bzw. den möglichen Schadensbildern eines Überflutungsereignisses und ihrer Erfassung eine hohe Bedeutung zukommt (siehe Abschnitt 2.1.3.2), steht bei der Entwicklung eines Risikomanagements die Gesamtheit der möglichen Schäden in Bezug auf ein definiertes Ereignis im Vordergrund. Hierfür hat sich in der Naturrisikoforschung der Begriff des **Schadenspotenzials** etabliert, der allgemein die „Gesamtheit aller aus einem bestimmten Gefährdungsbild möglicherweise resultierenden Schäden“ (Hollenstein 1996) umfasst. Im Hochwasser- und Starkregenrisikomanagement wird dieser Begriff von der DWA-

Arbeitsgruppe HW-4.4 ähnlich definiert als „allgemein die vorhandenen Werte in einem abgegrenzten Untersuchungsraum (...), die potenziell von einem definierten Schadensereignis (...) betroffen werden können und als schadenanfällig anzusehen sind“ (DWA 2012). Das Schadenspotenzial gilt somit als **oberer Grenzwert der möglichen Schäden**, in der Regel bezogen auf ein Referenzschadensereignis.

Das Merkblatt DWA-M 119 formuliert für den Anwendungskontext Starkregenrisikomanagement eine etwas konkretere Definition des Schadenspotenzials als die „Summe der möglichen materiellen (und gegebenenfalls immateriellen) Schäden und Schadenswirkungen, gegebenenfalls in einer monetären Bewertung, einschließlich evtl. betriebs- und volkswirtschaftlicher Folgeschäden“ (DWA 2016). Auch wenn hier kein expliziter Bezug auf ein definiertes Ereignis ausgedrückt wird, so wird dennoch die Abhängigkeit des Schadenspotenzials als Erwartungswert des möglichen Schadens von der Stärke und Ausprägung des Überflutungsereignisses vorausgesetzt.

Beide Definitionen betonen die vorhandene Wertevielfalt der Schutzgüter und das damit verbundene breite Spektrum möglicher Schadensarten sowohl im Einzelereignisfall als auch bezogen auf das mögliche Gesamtspektrum an Schadensereignissen. Für Hochwasser, urbane Sturzfluten und Starkregenüberflutungen gilt gleichermaßen, dass eine möglichst detaillierte Erfassung und problembezogene Bewertung aufgetretener Überflutungsschäden von zentraler Bedeutung für die Beurteilung des Überflutungsrisikos sind. Damit stellen sie indirekt auch eine essenzielle Arbeitsgrundlage für die Entwicklung und Umsetzung eines wirksamen Risikomanagements dar. Vor diesem Hintergrund bedarf es einer näheren Erläuterung und Differenzierung des Schadensbegriffs.

2.1.3.2 Schadensarten und -erfassung

Aufgrund der bestehenden Werte- und Schutzgütervielfalt des Siedlungsraums kommt es bei einem Überflutungsereignis in der Regel zu einer Vielzahl unterschiedlicher Einzelschäden, die sich in Summe für den Bewertungsraum zu einer komplexen Gesamtschadenssituation zusammensetzen. Es ist daher sinnvoll, Schäden problemspezifisch zu differenzieren, beispielsweise korrespondierend mit den unterschiedlichen Dimensionen von Vulnerabilität (siehe Abschnitt 2.1.2). So lassen sich personenbezogene Schäden (Gesundheit, Verletzungen, Todesfälle), materielle Schäden (Sachgüter, Wertobjekte und -gegenstände), sozio-kulturelle Schäden (Sozial- und Bildungseinrichtungen, Kulturgüter), ökologische Schäden (Umweltschäden, Zerstörung oder Beeinträchtigung von Flora und Fauna) oder ökonomische Schäden (Produktionsanlagen, Gewerbe- und Industrieobjekte) unterscheiden. Bei Starkregenüberflutungen wird eine Unterscheidung in materielle Schäden (Sach- und Gebäudeschäden) und immaterielle Schäden, z. B. Personenschäden, Umweltschäden, Schäden an Kulturgütern, Verlust ideeller Werte etc. vorgeschlagen (BMBF 2008; DWA 2013b, 2016). Die genannten Schadenskategorien lassen sich bedarfsweise in weitere Schadensarten differenzieren und konkretisieren, beispielsweise die Un-

terscheidung materieller Schäden in Gebäudeschäden, immobile und mobile Inventarschäden, usw. Das bei einer Starkregenüberflutung mögliche Spektrum an Schadensarten entspricht in weiten Bereichen dem hochwasserbedingter Schäden, wenngleich es ereignisbedingt Unterschiede in Relevanz und Ausmaß der Schadensarten gibt. Exemplarische Zusammenstellungen hochwasser- bzw. überflutungstypischer Schäden findet sich u. a. in (BMBF 2008; Müller 2010; DWA 2012).

Parker et al. (1987) unterscheiden Schäden mit einem stärkeren Fokus auf ihre Kausalität und Entstehung danach, ob die Hochwasserschäden durch unmittelbare Wassereinwirkung oder als Nebeneffekt durch mit der Überflutung einhergehende Prozesse auftreten (direkt – indirekt). Ergänzend unterscheiden Smith und Ward (1998), ob die Schäden monetär bezifferbar sind (tangibel – intangibel) und hinsichtlich ihres zeitlichen Auftretens (primär – sekundär). Abbildung 2-3 überträgt diese Systematik mit Schadensbeispielen auf Überflutungsschäden infolge Starkregens.

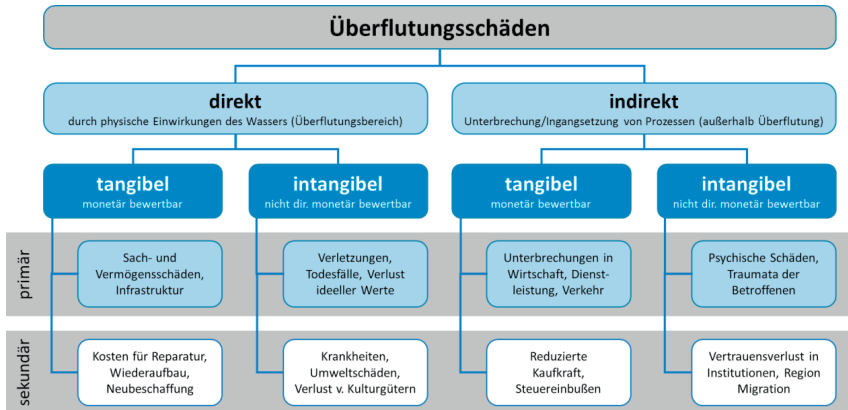


Abbildung 2-3: Einteilung von Überflutungsschäden, eigene Darstellung in Anlehnung an Smith und Ward (1998) und DWA (2012)

Der klaren theoretischen Systematik in Abbildung 2-3 stehen auf praktischer Seite erhebliche Schwierigkeiten und methodische Defizite bei der Erfassung, Quantifizierung und Bewertung von Hochwasser- und Starkregenüberflutungsschäden gegenüber. Selbst bei der Schadensbewertung eines einzelnen Überflutungs- oder Hochwasserereignisses ist in der Regel bereits eine komplexe Gesamtschadenssituation, bestehend aus mehreren, unterschiedlichen Schadensarten, zu identifizieren und zu beurteilen. Deren umfassende Beschreibung und Dokumentation ist kaum möglich, insbesondere wenn sekundäre Folgeschäden eines Ereignisses miteinbezogen werden sollen. Es ergeben sich dabei auch Schwierigkeiten bei der klaren

Zuordnung der vielfältigen Einzelschäden zu einzelnen Schadensdimensionen. Einzelschäden können sich gegenseitig beeinflussen bzw. voneinander abhängig sein, bspw. über die Kausalität direkter und indirekter Schäden. Aus diesen Gründen unterliegen Schadenserfassungen stets mehr oder weniger starken Vereinfachungen und Einschränkungen.

Im Hochwasserschutz wurde zwar bereits Ende der 1970er Jahre in Deutschland damit begonnen, Hochwasserschäden mit dem Anspruch einer Systematisierung datenbankgestützt zu erfassen (HOWAS, siehe Buck und Merkel 1999), dies aber nicht kontinuierlich fortgeführt. Mit der im Nachgang zum gravierenden Elbehochwasser 2002 initiierten BMBF-Förderaktivität RIMAX (Risikomanagement extremer Hochwässer, BMBF 2004) wurden verschiedene Verbundvorhaben gefördert, die sich der Erfassung und Bewertung von Überflutungsschäden und Bereitstellung von Hochwasserschadensinformationen widmen. Beispielhaft zu nennen sind hier das Projekt MEDIS mit einer Fortschreibung der Schadensdatenbank HOWAS21 (Thieken 2008; Thieken et al. 2010) sowie das Projekt VERIS-Elbe mit der Entwicklung des Hochwasserschaden-Simulationsmodells HOWAD (Schanze et al. 2015). Für das Themenfeld urbane Sturzfluten wurde im RIMAX-Projekt URBAS ebenfalls eine datenbankgestützte Schadenserfassung für das untersuchte Ereigniskollektiv durchgeführt (BMBF 2008). Die Erfassung der Schadensdaten erfolgt auf mikroskaliger Ebene, d. h. bezogen auf einzelne Schadensobjekte. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Erfassung direkter, tangibler Schäden, was der vergleichsweise einfachen Quantifizierbarkeit und begrenzten Datengrundlage zu den Gesamtschäden geschuldet ist. Es wird aber auch davon ausgegangen, dass diese Schadensart wesentlich die Gesamtkosten der Schadensbehebung und -kompensation bestimmt (Niekamp und Piroth 2013). Dennoch muss die Wertigkeit eines Risikoelements weiter gefasst und versucht werden, die intangiblen Schadensebenen (u. a. Schäden an „Leib und Leben“, Kulturgütern, Umwelt, Nutzungsbeeinträchtigungen etc.) trotz der damit verbundenen Schwierigkeiten und Defiziten der Quantifizierung zu bewerten.

Die Ursache-Wirkungsbeziehungen der Hochwasserschäden werden methodisch stark vereinfacht in empirische, wasserstandsabhängige Schadensfunktionen übertragen, die dann eine Abschätzung zu erwartender Schadensausmaße ermöglichen sollen (vgl. Apel et al. 2006; Messner 2006; FLOODSite 2009). Daneben wird ein erheblicher Einfluss der Flächennutzung auf die mögliche Schadensausprägung bei Überflutungen angenommen (vgl. Müller 2010). Weitere Einflussgrößen auf die Schadensausprägung, wie z. B. die Jährlichkeit, Dauer, Jahreszeit und Dynamik des Ereignisses (DWA 2012) bleiben dabei unberücksichtigt. Da man bei diesem empirischen Ansatz auf eine ausreichend hohe Anzahl an erfassten Schadensereignissen angewiesen ist und die Datengrundlage oftmals zu gering ist, werden Schadensdaten alternativ auch synthetisch ermittelt. Bei dieser, im angelsächsischen Raum etablierten Methode erfolgt die Ableitung von Schadensfunktionen auf Grundlage von Vorortbegehungen ohne Vorliegen eines

konkreten Ereignisses. Bei diesen sog. „Was-wäre-wenn-Analysen“ (*what-if analysis*) wird abgeschätzt, bei welchen Wasserständen welche Schäden zu erwarten wären (vgl. Niekamp und Piroth 2013; Thieken et al. 2010).

Die Ausführungen zu den Problemen und Defiziten einer umfassenden ereignisbezogenen Erfassung von Hochwasser- und Überflutungsschäden verdeutlichen, dass es umso schwieriger ist, im Hinblick auf die Bestimmung von Schadenspotenzialen die Gesamtheit möglicher Schäden eines Einzelobjekts oder gar Untersuchungsgebiets abzuschätzen. Viele der genannten Schwierigkeiten und Hemmnisse lassen sich in ihrer Gültigkeit vom Hochwasserrisikomanagement auf die Schadenserfassung und -bewertung bei Starkregenüberflutungen übertragen. Dabei kommen jedoch zusätzlich bzw. abweichend noch folgende Besonderheiten zum Tragen:

- Die bewertbare Datengrundlage ist im Vergleich zu Hochwasserschäden noch viel geringer bzw. meist überhaupt nicht vorhanden, da die Ereignisse in der Regel kleinräumiger sind und auf kommunaler Ebene unterhalb des Katastrophenfalls bewältigt werden (müssen). Erschwerend kommt hinzu, dass bei urbanen Starkregenüberflutungen intangible Schäden, z. B. durch Nutzungsbeeinträchtigungen und -störungen, vielfältiger und häufiger auftreten als tangible Schäden (ten Veldhuis und Clemens 2010).
- Informationen aus der Schadensregulierung der Versicherer sind grundsätzlich als Informationsquelle zumindest für die tangiblen Direktschäden geeignet. Allerdings sind sie aufgrund der noch geringen Verbreitungsquote von Elementarschadensversicherungen derzeit noch nicht adäquat verfügbar und müssten zudem anonymisiert bereitgestellt werden. Insofern stellen sie nur eine Teilmenge der notwendigen, auf einzelne Gebäude bezogenen Schadensinformationen dar. Deren Gesamtheit ist in der Regel nur den Gebäudeeigentümern und –nutzern bekannt. Hinzu kommt jedoch auch, dass anders als bei einem Flusshochwasser die im Zuge eines Starkregenereignisses auftretenden Schäden unterschiedliche Ursachen (Sturm und Windbruch, Hagel, etc.) haben können, die versicherungstechnisch als Elementarschäden zusammengefasst werden.
- Die bislang im Hochwasserschutz erarbeiteten Schadensfunktionen (Wasserstands-Schadens-Beziehungen) sind nur sehr eingeschränkt auf Starkregenüberflutungen übertragbar und anwendbar, bestenfalls dann, wenn die Ereignisausprägung den Charakter einer Sturzflut bzw. eines kleinen lokalen Hochwassers hat. Die im Vergleich zu Flusshochwassern jedoch häufig geringere Amplitude der Überflutungshöhen sowie kürzeren Expositionsphasen der Gebäude bedingen noch größere Unsicherheiten bei der Ableitung eines empirischen Zusammenhangs zwischen Wasserstand und Schadenssumme bzw. –ausmaß, auch angesichts der Komplexität des Oberflächenabflussprozesses im urbanen Raum (vgl. Zhou et al. 2012a).
- Für die Abschätzung von Schadenspotenzialen für Starkregenüberflutungen stehen bislang noch keine fundierten d.h. allgemein übertragbaren Schadens-

funktionen zur Verfügung. Einzelne Anwendungsbeispiele, bei denen auf Grundlage verfügbarer Schadensinformationen der Versicherungswirtschaft Schadenskurven abgeleitet wurden, ergaben mit Standardabweichungen zwischen 50% und bis zu 100% der Schadensmittelwerte große Unsicherheiten und Streubreiten (König et al. 2002; Freni et al. 2010). Ergänzend kommen König et al. (2002) anhand der Auswertung von Versicherungsdaten für zwei norwegische Großstädte zu der Einschätzung, dass abgestufte, abschnittsweise über die Überflutungshöhe konstante Schadenskurven besser geeignet sind als stetig ansteigende Schadensfunktionen.

Es bleibt festzuhalten, dass die für Deutschland verfügbare Daten- und Informationsgrundlage zur Analyse von Hochwasser- und Überflutungsschäden trotz der erläuterten Untersuchungen und Auswertungen (noch) schlecht bzw. ungenügend ist (Müller 2010; DWA 2016), was insbesondere bei der Schadenspotenzialanalyse von Starkregenüberflutungen zu methodischen Einschränkungen und Vereinfachungen führt (siehe Abschnitt 4.3).

2.1.4 Risiko

2.1.4.1 Definitionen und Denkschulen

Die bereits dargelegte Definitionsvielfalt bei den Risikokomponenten Gefahr und Vulnerabilität lässt unmittelbar erkennen, dass es auch ein entsprechend breites Spektrum an Risikodefinitionen gibt. Nach Birkmann (2008) lassen sich diese grob zwei unterschiedlichen Denkschulen zuordnen. Die erste Denkschule beschreibt eine „entscheidungstheoretische Sichtweise“ auf die Wahrscheinlichkeit eines schadensträchtigen Vorgangs oder Ereignisses. Risiko wird danach definiert „als Entscheidung eines Individuums oder eines Kollektivs, sich (...) so zu verhalten, dass man durch Ereignisse Schäden davon tragen kann“ (vgl. Dikau und Pohl 2007).

Im Zusammenhang mit Naturrisiken, die im Vordergrund der vorliegenden Ausführungen stehen, dominiert die zweite Risikodenkschule, die eine „natur- und technikwissenschaftliche Sichtweise“ verfolgt. Sie versteht Risiko als das Ergebnis der Interaktion bzw. des Zusammentreffens von einer Gefahr und einer vulnerablen Gesellschaft oder einem vulnerablen Objekt (Birkmann 2008). Die Interaktion ist sowohl räumlich als auch zeitlich zu verstehen, sodass Risiken als Resultat dieser Interaktion immer auch einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens unterliegen. Hauger et al. (2006) betonen dabei, dass die Gefahr bzw. Gefährdung als Risikoursache und die Vulnerabilität als Eigenschaft des Risikoobjekts anzusehen sind.

Die am weitesten verbreitete Risikodefinition dieser Denkschule formuliert die UN-Strategy for Disaster Risk Reduction (UNISDR) als die „**Wahrscheinlichkeit negativer Konsequenzen oder Verluste, die aus dem Zusammentreffen von natürlich oder anthropogen verursachten Gefahren und vulnerablen Gegebenheiten resultieren**“ (UNISDR 2004b; zitiert in Birkmann et al. 2013).

Auf nationaler Ebene wird diese Definition von wichtigen Gremien übernommen. Sinngemäß definiert der wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) Risiko allgemein als „**die Wahrscheinlichkeit des Eintretens negativer Auswirkungen**“ (WBGU 1999). Die Risikokommission der Bundesregierung definiert „**Risiko als Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Gefahr, die auf vulnerable Elemente trifft und dann zu einem Schaden führt**“ (Risikokommission 2003).

Die in den Definitionen genannten negativen Konsequenzen, Auswirkungen oder Verluste sind vielfältig, z. B. die Zerstörung von Besitztümern, der Verlust von Existenzgrundlagen, Umweltzerstörung oder gar Todesfälle. Über die Zielsetzung der Verlustvermeidung ergibt sich die Definition von Schutzgütern, die gleichzeitig auch als Risikoelemente (*elements at risk*) aufgefasst und bezeichnet werden, da sie dem Risiko der Beschädigung oder Zerstörung („Verlust“) ausgesetzt sind. Risikoelemente weisen eine individuelle, eigenschaftsabhängige Vulnerabilität auf (Abschnitt 2.1.2), die es im Rahmen einer Risikoanalyse zu bewerten gilt.

2.1.4.2 Anwendungskontext Hochwasser und Starkregenüberflutung

Die vorgenannte Definition der Naturrisiken-„Denkschule“ mit Risiko als Interaktion von Gefährdung und Vulnerabilität wird auch auf Hochwasser- und Überflutungsrisiken angewendet. Dabei lässt sich der funktionale Zusammenhang von Gefahr und Vulnerabilität, aus dem das Risiko resultiert, unterschiedlich mathematisch und grafisch ausdrücken, wie die Tabelle 2-6 bzw. Abbildung 2-4 verdeutlichen.

Tabelle 2-6: Übersicht gebräuchlicher Risikodefinitionen für den Anwendungskontext Hochwasser und Starkregenüberflutungen (*fluvial and pluvial floods*)

Nr.	Ansatz	Quelle
1	$Risk = f(hazard, vulnerability)$ bzw. $Risiko = f(Gefährdung, Vulnerabilität)$	Hauger et al. (2006); DKKV (2003)
2	$Risk = hazard \times vulnerability$	Garatwa und Bollin (2002); Wisner et al. (2003)
3	$Risk = f(hazard, vulnerability, exposure)$	Crichton (1999); Lenz (2009)
4	$R = H \cdot E \cdot V$ mit: R (risk), H (natural hazard), E (elements at risk), V (vulnerability)	UNDRP (1979)
5	$R = P \cdot I \cdot V \cdot E$ mit: R (risk), P (hazard probability), I (hazard intensity), V (vulnerability), E (elements at risk)	Tira (1997), zitiert in Glade (2003); Barroca et al. (2006); Caradot et al. (2011)

Die angeführten Risikodefinition basieren auf dem gleichen Denkansatz (s. o.), unterscheiden sich zum einen in der Differenzierung der explizit ausgewiesenen Risikokomponenten (Faktoren): Je nach Definition der Vulnerabilität (s. o.) ist die Exposition entweder darin enthalten oder sie wird als eigenständige Risikokomponente geführt. Auch werden die gefährdungsbestimmenden Größen Intensität und Wahrscheinlichkeit integriert oder eigens geführt. Zum anderen wird je nach Anwendungsrichtung entweder die Exposition (*exposure*) bei Bezug auf das Einzelobjekt oder die Anzahl der (exponierten) Risikoelemente (*elements at risk*) als Risikokomponente geführt.

Aufgrund ihrer fundamentalen Bedeutung für die Hochwasservorsorge auf europäischer und nationaler Ebene wird die Risikodefinition der Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (Hochwasserrisikomanagementrichtlinie - HWRM-RL) gesondert erwähnt. Art.2, Abs. 2 HWRM-RL definiert Hochwasserrisiko als „eine Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Hochwasserereignisses und der hochwasserbedingten potenziellen nachteiligen Folgen auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe und wirtschaftliche Tätigkeiten“ (HWRM-RL 2007). Die Formulierung entspricht damit den Definitionen nach UNISDR (2004b). Auf nationaler Ebene werden die genannten Schutzgüter (Risikoelemente, s. o.) in der Neufassung des Wasserhaushaltsgesetzes vom 01. März 2010 (WHG 2009) um das Schutzgut „erhebliche Sachwerte“ ergänzt (§73 WHG).

Das Merkblatt DWA-M 119 (DWA 2016) übernimmt diese erweiterte Definition weitgehend. Es bezieht sich lediglich anstelle der Vulnerabilität auf die Ersatzgröße „Schadenspotenzial“, was der mangelnden Quantifizierbarkeit der Vulnerabilität Rechnung trägt. In DWA-M 119 wird Überflutungsrisiko demnach definiert als:

„Verknüpfung von Überflutungsgefährdung und Schadenspotenzial für ein Objekt oder eine Fläche in Anlehnung an WHG § 73: Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Überflutungsereignisses mit den möglichen nachteiligen Überflutungsfolgen für die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe, wirtschaftliche Tätigkeiten und erhebliche Sachwerte.“ (DWA 2016, S. 11)

Für den 2-komponentigen Risikoansatz ist in der Hochwasser- und Überflutungsvorsorge die Darstellung als Schnittmenge nach DKKV (2003) anzutreffen (Abbildung 2-4 a). Sie veranschaulicht sehr gut den Sachverhalt, dass Risiko aus der räumlichen Nähe und Überlagerung von Gefährdung und Vulnerabilität des exponierten Objekts resultiert. Das Überflutungsrisiko kann vermindert werden, indem die Risikokomponente Gefährdung und/oder die Risikokomponente Vulnerabilität verringert wird/werden, was die bestimmende Aufgabe eines angepassten Risikomanagements mit zielgerichteten Maßnahmen der Prävention und Vorsorge darstellt (vgl. Hauger et al. 2006). Diese Darstellung lässt sich beim 3-komponentigen Risikoansatz um eine dritte Teilmenge „Exposition“ erweitern (z. B. Gocht und Merz 2002). Die alternative Darstellung eines Risikodreiecks (Crichton 1999; Lenz 2009) ist jedoch hierfür anschaulicher: Das Risiko ergibt sich als die von den drei Seiten (Komponen-

ten) aufgespannte Dreiecksfläche (vgl. Abbildung 2-4 b). Diese wird null, falls eine der drei Seiten null bzw. nicht vorhanden ist. Eine Reduktion des Risikos kann durch Verringerung einer oder mehrerer Risikokomponenten erfolgen.

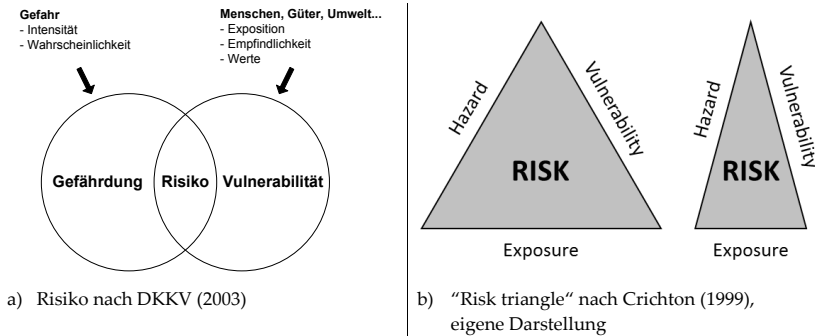


Abbildung 2-4: Beispiele grafischer Risikodarstellungen

Aufgrund der herausragenden Bedeutung **Kritischer Infrastrukturen** (KRITIS, siehe Abschnitt 2.2) und ihres Schutzbedarfs bei Starkregenüberflutungen ergeben sich gesonderte Fragestellungen der Vulnerabilitäts- und Risikobewertung, die sich auch in eigenen Definitionen widerspiegeln. So wird das Ausfall- und Schadensrisiko einer Kritischen Infrastruktur(-Komponente) wesentlich mitbestimmt von der Zeitspanne des Ausfalls und dem Ausmaß an gravierenden Konsequenzen, den der Ausfall für die Bevölkerung hat. Lenz (2009) erweitert dazu die Risikodefinition nach Crichton (1999) um die eigenständigen Risikokomponenten Bewältigungskapazität und Kritikalität (Abbildung 2-5).

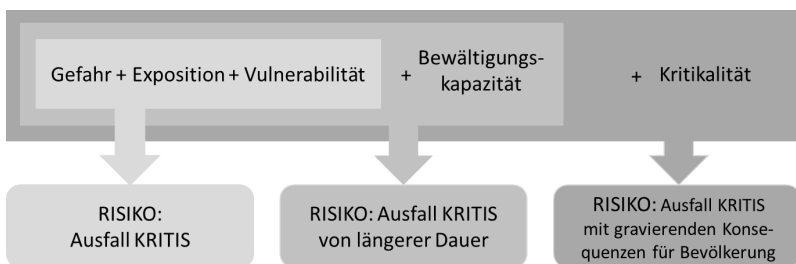


Abbildung 2-5: KRITIS-bezogene Risiken und erforderliche Risikokomponenten (verändert nach Lenz 2009)

2.2 Kritische und sensible Infrastrukturen als Risikoelemente

2.2.1 Kritische Infrastrukturen

Die für Deutschland geltende Definition Kritischer Infrastrukturen geht auf einen Beschluss des Arbeitskreises KRITIS im Bundesministerium des Innern (BMI) vom 17. November 2003 zurück. Sie bezieht sich auf „Organisationen und Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden“ (BMI 2005). Die Kritikalität selbst definiert sich darin als „relatives Maß für die Bedeutung einer Infrastruktur in Bezug auf die Konsequenzen, die eine Störung oder ein Funktionsausfall für die Versorgungssicherheit der Gesellschaft mit wichtigen Gütern und Dienstleistungen hat“ (BMI 2009; Lenz 2009).

Kritische Infrastrukturen lassen sich systematisch und hierarchisch unterscheiden, wenngleich es hierzu unterschiedliche Ansätze und zeitliche Fortschreibungen gibt. Lenz (2009) unterscheidet in allgemeiner Hierarchie nach Sektoren (erste Ebene, z. B. Energie), Infrastrukturen (zweite Ebene, z. B. Elektrizitätsversorgung) und Infrastrukturkomponenten (dritte Ebene, z. B. Umspannwerk). Die Sektoren selbst lassen sich nach funktionalen Gesichtspunkten und hinsichtlich ihrer gesellschaftlichen Relevanz nochmals in die Sektorengruppen bzw. Kategorien „Basisinfrastrukturen“, „sozioökonomische Infrastrukturen“ und „soziokulturelle Infrastrukturen“ zusammenfassen (Queste et al. 2007; Lauwe und Riegel 2008). Der aktuelle Stand einer einheitlichen Sektoreinteilung der Kritischen Infrastrukturen geht auf die Festlegung einer Bund-Länder-Arbeitsgruppe von 2011 zurück, die die zwei Bereiche „technische Basisinfrastrukturen“ und „sozioökonomische Dienstleistungsinfrastrukturen“ mit neun Sektoren und 29 Branchen ausweist (BMI 2011b, siehe Abbildung 2-6).

Die Aufgabe des Schutzes Kritischer Infrastrukturen ist sehr komplex und bedarf einer starken Vernetzung und Kooperation verschiedenster Institutionen. Auf Bundesebene ist das Bundesministerium des Inneren (BMI) zusammen mit dem Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) sowie dem Bundesamt für Sicherheit und Informationstechnik (BSI) für die zivile Sicherheit und damit den Schutz Kritischer Infrastrukturen zuständig. Daneben sind in der Regel die für den Katastrophenschutz der Bundesländer zuständigen Innenressorts, die betroffenen Landkreise und Kommunen und letztlich natürlich die Betreiber Kritischer Infrastrukturen einzubeziehen, da Kritische Infrastrukturen größtenteils in privatwirtschaftlicher Verantwortung sind (BMI 2007).

Zum Schutz Kritischer Infrastrukturen vor Hochwasser- und Überflutungsschäden bedarf es zunächst einer fundierten Analyse der Überflutungsrisiken, um die begrenzten finanziellen und personellen Ressourcen zum Schutz der Infrastrukturen im Ereignisfall effizient und bestmöglich einzusetzen (BMI 2011a).

Die Schwierigkeit bei der Bewertung von Komponenten Kritischer Infrastrukturen als Risikoobjekte ergibt sich aus dem Sachverhalt, dass Kritische Infrastrukturen als komplexe Systeme angelegt sind, deren Einzelelemente (Komponenten) vielfältigen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen (Interdependenzen) unterliegen (u. v. a. Queste et al. 2007; Lauwe und Riegel 2008; BMI 2009; Lenz 2009; Braubach 2011). Die Abhängigkeiten ergeben sich sowohl horizontal, d. h. innerhalb der Ebene (zwischen Einzelkomponenten) als auch vertikal, d. h. zwischen den Branchen- oder Sektorebenen, wie es häufig bei den Basisinfrastrukturen (Energieversorgung, Telekommunikation, etc.) erkennbar ist. Zur weiteren Charakteristik und Differenzierung der Abhängigkeiten und Interdependenzen (physische – informationstechnische – geografische) sei exemplarisch auf die Ausführungen und Beispiele in (Lenz 2009, 23ff) verwiesen.

Insgesamt lässt sich das Schadens- und Ausfallrisiko bzw. die Vulnerabilität einer einzelnen, beispielsweise durch eine Starkregenüberflutung gefährdeten KRITIS-Komponente ohne Kenntnis ihrer Einbindung und funktionalen Stellung im Gesamtsystem nicht umfassend beurteilen. Gerade den durch den Ausfall einer Kritischen Infrastruktur-Komponente ausgelösten Indirekt- und Sekundärschäden (vgl. Abschnitt 2.1.3.2) kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu, die in der erweiterten Risikodefinition nach Lenz (2009) mit den eigenständigen Risikokomponenten Bewältigungskapazität und Kritikalität Ausdruck findet (vgl. Abbildung 2-5). Dementsprechend wird für Kritische Infrastrukturen die Risikoanalyse um eine Kritikalitätsabschätzung erweitert, die die Gefährdungs- und Vulnerabilitätsanalyse ergänzt (BMI 2011a).

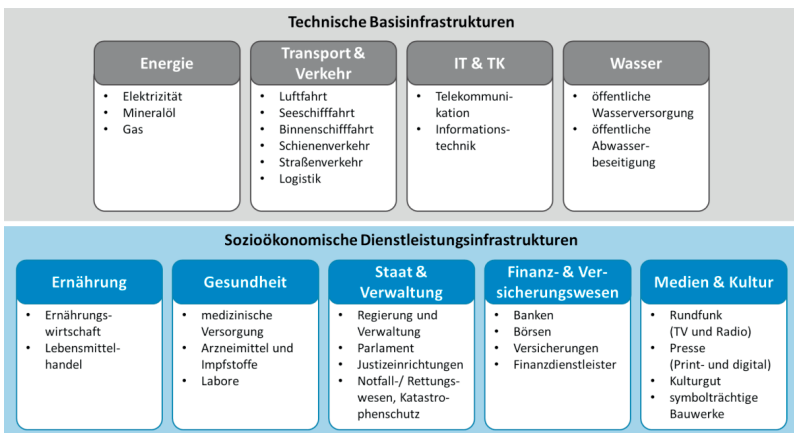


Abbildung 2-6: Sektoren und Branchen Kritischer Infrastrukturen (verändert nach BMI 2011b)

2.2.2 Sensible Infrastrukturen und Objekte

Im Zusammenhang mit Kritischen Infrastrukturen werden oftmals auch die Begriffe „sensible Infrastrukturen“ oder „sensible Objekte“ angeführt und diskutiert. Ihre Verwendung ist nicht einheitlich und nicht allgemein gültig. Einerseits findet man die synonyme Verwendung für kritische Infrastrukturen, beispielsweise wenn es um den Anwendungskontext IT-Sicherheit bzw. Sicherheitstechnologien für kritische Infrastrukturen geht (z. B. NICE o.J.).

Andererseits wird im Hochwasserschutz der Begriff „hochwassersensible Objekte“ (bzw. Infrastruktur) in allgemeiner Form für Risikoobjekte mit einem gesonderten, hervorgehobenen Schutzbedürfnis gebraucht. In Abgrenzung zu Kritischen Infrastrukturen konkretisiert sich der Begriff auf Einrichtungen und Organisationen, die aufgrund ihrer Nutzung und Bedeutung für die Gemeinschaft einen hohen finanziellen oder gesellschaftlichen Wert und ein ähnlich hohes Schutzbedürfnis wie Kritische Infrastrukturen aufweisen. Im Gegensatz dazu wirken sie sich jedoch bei Schädigung oder Ausfall nicht schädlich auf andere Elemente oder Systeme, bspw. die öffentliche Sicherheit, aus (vgl. AKNZ 2014). Im Hinblick auf die für Kritische Infrastrukturen erweiterte Risikodefinition nach Lenz (2009) kommt demnach bei hochwassersensiblen Infrastrukturen und Objekten die Komponente Kritikalität nicht zum Tragen (vgl. Abbildung 2-5).

Es existiert bislang keine abschließende Zusammenstellung, welche Objekte und Einrichtungen als „hochwassersensible Infrastrukturen“ gelten. Als Beispiele hierfür sind öffentlich genutzte Einrichtungen wie Bildungsstätten (Schulen, Hochschulen, Forschungseinrichtungen, etc.), Sozialeinrichtungen (Kindergärten, Pflege- und Wohnheime für Senioren, Menschen mit Behinderungen, etc.) sowie Veranstaltungsstätten für Kultur, Religion oder Sport zu nennen; aber es werden auch bspw. Tierheime und Zoos hierunter geführt (vgl. AKNZ 2014). Auch der Begriff „Infrastruktur“ ist insofern einzuschränken, dass er keine Infrastruktursektoren oder -branchen, sondern vielmehr sensible Einzelobjekte adressiert. In (BBK 2013) werden Objekte wie Krankenhäuser, Alten-, Pflege- und Wohnheime, Grundschulen oder Kindergärten als „sozioökonomische Dienstleistungsinfrastrukturen“ aufgefasst und vergleichbar zu Kritischen Infrastrukturen behandelt, auch wenn sie nicht den Sektoren des BMI zuordenbar sind.

Hochwassersensible Infrastrukturen sind hinsichtlich ihrer Überflutungsvulnerabilität und ihres Schutzbedarfs zwischen Komponenten Kritischer Infrastrukturen und sonstigen Risikoobjekten einzuordnen. Allerdings ist die Abgrenzung gegenüber diesen beiden nicht immer eindeutig möglich, beispielsweise wenn zu entscheiden ist, ob Pflege-, Rehabilitations- und Kureinrichtungen der KRITIS-Branche „Medizinische Versorgung“ zuzuordnen oder als sensible Infrastruktur zu behandeln sind. Ähnliche Unklarheiten sind bei der Einordnung von Kultureinrichtungen in den Kritische Infrastrukturen/Sektor „Kulturgut“ möglich.

Es wird im Folgenden angenommen, dass die Übertragbarkeit des Begriffs aus dem Hochwasserschutz auf „überflutungssensible Infrastrukturen“ für den Anwendungsfall Starkregenüberflutungen gegeben ist. Die Frage, ob und in welchem Umfang überflutungssensible Risikoobjekte hierbei eines gesonderten Bewertungsstatus bedürfen, ist abhängig von Konzeption, Bezugsskala und Detailliertheit der durchgeführten Vulnerabilitäts- und Risikobewertung zu beantworten (Abschnitt 6).

2.3 Analyse- und Bewertungsmethoden starkregenbedingter Überflutungsrisiken

2.3.1 Gefährdungsanalyse

2.3.1.1 Kenntnis- und Entwicklungsstand

Das Merkblatt DWA-M 119 definiert den Prozess der Gefährdungsanalyse als „methodische Vorgehensweise zur Lokalisierung des Auftretens und zur Beurteilung des Ausmaßes starkregenbedingter Überflutungen; je nach Methode für unterschiedliche Niederschlagsbelastungen“ (DWA 2016). Als Terminologie wird „Gefährdungsanalyse“ erst seit wenigen Jahren im Kontext einer risikoorientierten Bewertung von Starkregenüberflutungen (Schmitt 2011; DWA 2016) verwendet. Der Begriff ist jedoch eng verknüpft mit dem seit jeher in der Siedlungsentwässerung verfolgten Schutzziel des Überflutungsschutzes (DWA 2006b), d. h. mit der Vermeidung und Einschränkung von Überflutungsschäden infolge einer überlasteten Entwässerungsinfrastruktur. Hierfür bildet der hydraulische Leistungsnachweis von Entwässerungssystemen durch Abflusssimulationsmodelle eine fundamentale, jedoch bzgl. der Überflutungsgefährdung begrenzt aussagefähige Informations- und Planungsgrundlage (DWA 2006a).

Die sachgerechte Abbildung des urbanen Niederschlags-Abfluss-Prozesses erfordert die gemeinsame Betrachtung der beiden sich beeinflussenden Systemgrößen Oberflächen- und Kanalisationsabfluss. Dies gilt insbesondere, wenn die hydraulische Leistungsfähigkeit der Kanalisation erreicht oder überschritten wird und es zu Überstau und Wasseraustritt auf die Oberfläche kommt, womit die Interaktion der beiden Teilsysteme zunimmt. Mit zunehmender Niederschlagsbelastung verliert der Abflussbeitrag der Kanalisation an Bedeutung und das maßgebliche Abfluss- bzw. Überflutungsgeschehen verlagert sich auf die urbanen Oberflächen. Dieser Sachverhalt hat bereits vor ca. 50 Jahren in Nordamerika zu den Bezeichnungen „*minor system*“ oder „*initial system*“ für die Kanalisation und „*major system*“ für die Oberfläche und zu entsprechend abgestuften Bemessungs- bzw. Planungshäufigkeiten der Niederschlagsbelastung für beide Komponenten geführt (DRCOG 1969; zitiert in Smith 2006).

Folgerichtig lässt sich an der Entwicklungshistorie der Modellierung urbaner Entwässerungssysteme, beginnend bei der hydrodynamischen 1D-Kanalnetzsimulation mit vereinfachten hydrologischen Oberflächenabflussmodellen bis hin zur gekoppelten 1D/2D-Simulation von Kanalnetz und Oberfläche (*dual drainage modeling*), das permanente Bestreben erkennen, den Oberflächenabfluss als Systemkomponente generell bzw. in besserer Form prozesstechnisch abzubilden (u.a. Djordjević et al. 1999; Schmitt et al. 2004; Mark et al. 2004; Boonya-aroonnet et al. 2007; Maksimović et al. 2009).

Neben leistungsfähigen Soft- und Hardwarekomponenten fehlte jedoch lange Zeit auch die geeignete Datengrundlage, um Analysen des oberirdischen Abflussgeschehens in Interaktion mit dem Kanalabfluss durchzuführen (Djordjević et al. 1991; Maksimović und Prodanović 2001; Schmitt et al. 2004). Inzwischen haben sich sowohl die gesamte Datengrundlage als auch das Datenmanagement zur Abflussmodellierung urbaner Oberflächen deutlich verbessert. Die verfügbaren Auflösungen digitaler Geländemodelle (DGM) liegen inzwischen bei mehreren Datenpunkten pro Quadratmeter (siehe Abschnitt 2.5.4.2). Darüber hinaus existieren häufig Katasterinformationen zu diversen ableitungsrelevanten Elementen an der Oberfläche (Straßeneinläufe, Durchlässe, etc.), die in die Modellierung einbezogen werden können. Zusätzlich haben die Weiterentwicklungen im Bereich GIS die Implementierung von Oberflächenstrukturen in Entwässerungsmodelle erheblich vereinfacht und maßgeblich zur Weiterentwicklung der gekoppelten Simulation beigetragen.

Vor diesem Hintergrund können inzwischen die in EN 752 bzw. DWA-A 118 geforderten Überflutungsprüfungen für kommunale Entwässerungssysteme (vgl. DWA 2008) methodisch und datentechnisch detaillierter durchgeführt werden. Dabei liefert die Gefährdungsanalyse mit der Lokalisierung und Ausweisung von Fließwegen und Senken sowie – je nach Methode – von belastungsabhängigen Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten und Abflüssen wertvolle Detailinformationen zu den örtlich vorherrschenden, überflutungsrelevanten Gegebenheiten. Insbesondere die Fragestellung nach dem Verbleib des Wassers, das aus dem Entwässerungsnetz austritt, lässt sich eingehender beantworten und in die erforderliche Risikobetrachtung einbeziehen. Entsprechende Anwendungsbeispiele beschreiben u. a. Schmitt et al. (2002), Fuchs et al. (2009).

Der Einsatzbereich der Gefährdungsanalyse geht jedoch weit über den Nachweis kanalinduzierter Überflutungen infolge Überstaus hinaus. Sie wird als Element und erster Arbeitsschritt der Risikoanalyse angesehen, um insbesondere bei außergewöhnlichen Regenereignissen das Gefahrenpotential von Oberflächenabflüssen zu beurteilen, wenn die Aufnahmekapazität der Entwässerungsinfrastruktur erschöpft ist. Dabei stehen insbesondere die mit Sturzfluten häufig genannten Aspekte, wie topografische Besonderheiten (Relief- und Geländeneigungswechsel), die Relevanz von Außengebietszuflüssen zum Siedlungsraum oder die Interaktion des Oberflächenabflusses mit urbanen Fließgewässern besonders im Fokus.

Der Begriff der Gefährdungsanalyse (*hazard assessment*) wird im internationalen Kontext zudem sowohl auf fluviale als auch pluviale Überflutungen angewendet und in die entsprechenden Risikoanalysen integriert (vgl. Abschnitt 2.3.3). Entsprechend differenziert erfolgt dabei die Auswahl geeigneter Gefährdungsindikatoren (vgl. Hauger et al. 2006). Daneben kommen je nach angestrebter Ergebnistiefe auch methodische Alternativen zur gekoppelten Simulation zum Einsatz, weil deren Vorteile aufgrund des vernachlässigbaren Kanalisationseinflusses in den Hintergrund treten.

Im Übrigen unterliegen auch gekoppelte 1D/2D-Modellierungen urbaner Überflutungen angesichts des Anspruchs, gleichermaßen zuverlässige wie detaillierte Ergebnisse zu liefern, vielen Unwägbarkeiten und Unsicherheiten. Diese ergeben sich aus den zahlreichen Eingangsparametern und Randbedingungen. Beispielhaft sind hier die Eingangsgröße Niederschlag, der Detaillierungsgrad in der Berücksichtigung baulicher Strukturen, die Berechnungsansätze zur Abflussbildung und des Oberflächenabflusses oder bei gekoppelter Simulation die Modellierung des bidirektionalen Abflussaustauschs zu nennen. Die Einflüsse dieser Details und ihre modelltechnische Berücksichtigung sind noch Gegenstand der Forschung (vgl. Hürter 2018; HSB 2017; Fuchs und Schmidt 2015). Hinzu kommt, dass nachweislich ergebnissensitive Einzelprozesse eines Starkregenereignisses, wie z. B. die tatsächlich stattfindenden Überflutungen von Untergeschossen oder die Verlegung von Straßeneinläufen und Entwässerungsrinnen durch Geröll, Laub oder Hagel modelltechnisch bislang nicht berücksichtigt werden. Entsprechende Ausführungen zur Relevanz dieses Prozesses sind u. a. in (ten Veldhuis et al. 2009; Caradot et al. 2011; Cherqui et al. 2015) beschrieben.

Insofern stellen lastfallbezogene Simulationsergebnisse in Form von Abflüssen, Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen zwar sehr detaillierte Überflutungsinformationen bereit, die als unbestrittene Fortschritte anzusehen sind. Aber die Frage nach einer adäquaten Validierung dieser Ergebnisse lässt sich noch immer nicht hinreichend beantworten, so dass letztlich die vermutete hohe Abbildungsgüte der gekoppelten Simulation noch zu belegen sein wird.

2.3.1.2 Methoden und Anwendungsbeispiele

Das nationale Regelwerk formuliert in Merkblatt DWA-M 119 (DWA 2016) technische Empfehlungen zu verschiedenen Methoden der Gefährdungsanalyse, u. a. auch zum Ansatz der GIS-gestützten topografischen Gefährdungsanalyse. DWA-M 119 unterscheidet zwischen belastungsabhängigen und –belastungsunabhängigen Methoden, je nachdem, ob diese sich auf ein definiertes Starkniederschlagsereignis und dessen Oberflächenabfluss beziehen. Weitere Unterscheidungen ergeben sich, wie in Tabelle 2-7 dokumentiert, aus den untersuchten Teilsystemen (Entwässerungssystem, Oberfläche, Gewässer), dem ggf. berücksichtigten Grad ihrer Interaktion sowie der Detaillierung, Bearbeitungstiefe und Aussagekraft der Untersuchungs- bzw. Rechnungsmethodik (DWA 2016).

Tabelle 2-7: Teilsysteme, Aussage- und Ergebnistiefen verschiedener Methoden der Gefährdungsanalyse nach DWA-M 119 (DWA 2016, ergänzt)

Methoden	Teilsysteme ¹⁾	Überflutungssimulation	Aussage/ Ergebnisse
belastungsunabhängig			
Überstau Berechnung	K	nein	überstaute Schächte, Überstauvolumen, Auslastung der Kanalhaltungen, Schachtwasserstände
● GIS-Analyse	O	nein	Lage, Verlauf und Charakteristik von Geländesenken und oberirdischen Fließwegen
belastungsabhängig			
● Statische Volumenbetrachtung	(K →) O	nein	Wasserstände in Geländetiefpunkten, ggf. infolge Kanalnetzüberstaus
Straßenprofilmethode (1D/1D)	K ↔ S	ja	Wasserstände in definierten Straßenprofilen, örtliche Wasserübertritte
2D-Simulation des Oberflächenabflusses	O (↔ G)	ja	flächendeckende Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten an der Oberfläche
Gekoppelte 1D/2D-Abflusssimulation	K ↔ O (↔ G)	ja	flächendeckende Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten an der Oberfläche, Auslastung der Kanalhaltungen,

¹⁾ Legende Teilsysteme: K (Kanalisation); O (Oberfläche); S (Straßenprofil); G (Gewässer);
 → / ↔ (Datentransfer- bzw. Kopplungsrichtung der Teilsysteme)
 ● thematischer Schwerpunkt dieser Arbeit

Das Spektrum der Berechnungsansätze, das im Rahmen dieser Arbeit nicht vertiefend dargelegt wird, spannt sich sehr weit zwischen einfachen, stationären Volumenbetrachtungen bis hin zu den bereits erläuterten gekoppelten 1D/2D-Abflusssimulationen. Weiterführende Informationen zu den Methoden der Überflutungsberechnung sind in einem Arbeitsbericht der DWA-AG ES-2.6 „Abfluss- und Schmutzfrachtsimulation“ (DWA 2013a) beschrieben. Diverse Anwendungsberichte mit teils vergleichenden Modellbetrachtungen finden sich z. B. in (Fuchs 2013; Hoppe et al. 2014; Fuchs und Schmidt 2015; HSB 2017).

Der Einsatz der unterschiedlichen Methoden der Gefährdungsanalyse hat problembezogen und zielgerichtet zu erfolgen. Die Methodenauswahl richtet sich u. a. nach

- der Ausgangssituation als Veranlassung der Gefährdungsanalyse und der Komplexität der Randbedingungen im Untersuchungsgebiet,
- den konkreten kommunalen Zielvorstellungen der Überflutungsvorsorge,
- der Verfügbarkeit und Qualität der Bearbeitungsressourcen (Geodatengrundlage, EDV-Ausstattung mit Hard- und Software, Qualifikation der Bearbeitenden, etc.).

Liegen in einer Kommune noch keine umfassenden Erfahrungen mit Starkregenüberflutungen vor und fehlen noch entsprechende Anhaltspunkte für eine Risikoabschätzung, empfiehlt es sich zunächst, eine GIS-Analyse der Topografie als vereinfachte Gefährdungsbetrachtung durchzuführen, die als „Schnellanalyse“ (Illgen und Schäfer 2010) oder „Grobanalyse“ (Hoppe et al. 2012) erste wichtige gebietsweite Gefährdungsinformationen liefert. Darauf aufbauend lassen sich zur Konkretisierung der Gefährdungsinformationen und Entwicklung von Vorsorge- und Schutzmaßnahmen die lastfallabhängigen simulationsgestützten Methoden verwenden. Die Empfehlung einer **abgestuften Vorgehensweise** und bedarfsgerechten Verwendung der Methoden sind sowohl regelwerksbezogen (Schmitt 2011; DWA 2013a, 2013b, 2016) als auch anwendungsbezogen im Rahmen von Pilotstudien (z. B. Illgen und Schäfer 2010; Niemann und Illgen 2011; Hoppe et al. 2012; LANUV 2012) formuliert. Sie wird zudem von einer ersten, wenn auch nicht repräsentativen Umfrage von 16 Mittel- und Großstädten Deutschlands bestätigt (Krieger 2018). Darüber hinaus belegt die Umfrage die hohe Anwendungsrelevanz der topografischen Gefährdungsanalyse, die in ca. zwei Drittel der befragten Städte zum Einsatz kam. Trotzdem finden sich in der Fachliteratur nur vereinzelt Beschreibungen konkreter Anwendungsbeispiele, bei denen auf Detailfragen der GIS-gestützten topografischen Gefährdungsanalyse eingegangen wird.

Kluck et al. (2010) beschreiben für die **Stadt Apeldoorn/Niederlande** ein Softwaretool, mit dem auf Grundlage einer GIS-Analyse eine „städtische Regenwasserüberflutungskarte“ („WaterOverlast LandschapsKaart“) generiert werden kann. Die Datengrundlage bildet ein DGM mit einem Datenpunkt pro m^2 (vergleichbar DGM1), das partiell ergänzt wird durch höher aufgelöste Bereiche (bis zu 10 Punkte/ m^2). Die Siedlungsflächen werden grob kategorisiert in undurchlässig befestigte Flächen, Grünflächen (Grünanlagen) und Oberflächengewässer. Die Kartendarstellung basiert auf der statischen Volumenbetrachtung für einen „Jahrhundertregen“ mit einer Niederschlagsintensität von $i_N = 60 \text{ mm/h}$. Dabei werden Infiltrationseffekte vernachlässigt und der Abflussbeitrag der Kanalisation mit einem Pauschalabzug von 20mm/h bilanziert, was entsprechend den niederländischen Bemessungsvorgaben einer Häufigkeit von $n = 0,5 \text{ a}^{-1}$ entspricht. Die zur GIS-Analyse von Senken und Fließwegen erforderlichen Aufbereitungsschritte (DOM-Erstellung aus LiDAR-Rohdaten, Glättungsansätze, Fließwegengenerierung, etc.) werden nicht im Einzelnen beschrieben. Kluck et al. (2010) verweisen auf die allgemeine Bedeutung der DGM-Auflösung und empfehlen eine Mindestauflösung von einem Höhenpunkt pro Quadratmeter. Bei größerer Auflösung steigt die Wahrscheinlichkeit des Übersehens von „kritischen Gassen und Straßen“ an. Dennoch können nach Einschätzung der Autoren auch gröbere DGM-Auflösungen für extremere Regenereignisse noch verwertbare Informationen liefern. Sie weisen zwar auf partielle Ungenauigkeiten der Methodik bei der Abbildung kleinräumiger urbaner Strukturen hin, sehen jedoch hinsichtlich der Intention des Kartenwerks als interdisziplinäres Kommunikationsmedium für beteiligte Akteure und Betroffene keinen detaillierteren Modellierungsbedarf. Es wird ab-

schließlich anhand weiterer erfolgreicher Anwendungsbeispiele in den Niederlanden, in Bergen und Rio de Janeiro, auf die gute Übertragbarkeit und generelle Anwendbarkeit zur Vorbereitung und Unterstützung von Maßnahmenplanungen hingewiesen (Kluck et al. 2010).

Für das **Pilotgebiet Stuttgart** wird in (Nichler et al. 2010; Illgen und Schäfer 2010; Nichler et al. 2011) eine GIS-gestützte geländetopografische Analyse als Methode zur Erstabschätzung von Überflutungsbereichen beschrieben. Sie bildet die erste Stufe einer vereinfachten Schnellanalyse von Überflutungsrisiken und weist anhand von oberirdischen Senken und Fließwegen potenzielle Risikogebiete für Starkregenüberflutungen aus. Es wird empfohlen, darauf aufbauend für diese Bereiche eine bedarfsgerechte Detailanalyse zur vertiefenden Überflutungsbetrachtung anhand von Oberflächenabflussimulationen durchzuführen. Das vorgestellte Gesamtkonzept einer abgestuften Gefährdungs- und Risikoanalyse wird anhand einer vereinfachten hydrologischen Bilanzierung eines extremen Überflutungsereignisses von 2009 entwickelt. Die Autoren bestätigen auf Grundlage eines Abgleichs mit den Beobachtungen und Schadensbildern dieses Ereignisses in Stuttgart eine „überaus zufriedenstellende Güte der Betrachtung“ (Nichler et al. 2010, S. 15). Sie weisen jedoch ergänzend auch auf eine methodisch bedingte, tendenzielle Überschätzung der Überflutungsrisiken durch die Vernachlässigung des kommunalen Entwässerungssystems hin.

Auf Grundlage einer stadtgebietsweiten GIS-gestützten Gefährdungs- und Risikoanalyse für **Wuppertal** ist in (BBK 2013) eine Methodik zur Abschätzung von Senken beschrieben. Hierbei wird entsprechend der landesspezifischen Datenverfügbarkeit in NRW ein hochaufgelöstes DGM-1L zurückgegriffen, das über eine Auflösung von 1 bis 4 Höhenpunkten pro Quadratmeter verfügt und das durch Kriging-Interpolation auf ein reguläres Raster mit 25 cm Rasterweite umgerechnet wurde. Weitere Spezifikationen dieses Anwendungsbeispiels sind in (Beck 2012; Czickus 2014) beschrieben: Die Fließwegermittlung erfolgt als Multiflow-Ansatz über den MFD8-Algorithmus (siehe Abschnitt 4.2.4), mit dem insbesondere „an divergenten Hängen, flach geneigten Bereichen und Kuppen (...) realitätsnahe Fließwege ermittelt“ werden können (Czickus 2014). Senken werden ab einer Tiefe von 20 cm und mit einer Mindestausdehnung von 1 m² als signifikante Gefährdungsbereiche angesehen (BBK 2013). Bei der Volumenbilanzierung eines definierten Niederschlagsereignisses wird der Abflussbeitrag der Kanalisation dadurch berücksichtigt, dass erst ab einer Ereigniswiederkehrzeit von $T_n = 2$ a ein Senkeneinstau erfolgt (Czickus 2014).

2.3.1.3 Fazit

Methodisch ist die Gefährdungsanalyse als wichtiger Arbeitsschritt zur Identifikation und Bewertung pluvialer Überflutungsrisiken im Siedlungsraum als Weiterentwicklung des in (DWA 2006a, 2008) formulierten Arbeitsauftrages der Überflutungsprüfung bzw. Bewertung der Überflutungssicherheit anzusehen. Der hierfür zwischenzeitlich erzielte Entwicklungsstand wurde durch die enormen Fortschritte bei der Datenverfügbarkeit und Datenqualität sowie der Leistungsfähigkeit der Werkzeuge (Modelle, Hardware) erreicht.

Die topografische Gefährdungsanalyse liefert erste wichtige Hinweise auf Überflutungsgefährdungen und findet aufgrund ihrer vergleichsweise schnellen und effektiven Durchführung breite Anwendung. Diese erlaubt jedoch viele „Freiheitsgrade“ durch individuelle Festlegungen ergebnisrelevanter Parameter seitens des/der Bearbeitenden. Anhand der durchgeführten Literaturstudie kann hierzu folgendes festgehalten werden:

- Der ergebnisbestimmende Einfluss der DGM-Auflösung sowohl auf die Abbildungsgüte von oberirdischen Senken und Fließwegen als auch auf die Modellierung oberirdischer Abflussprozesse wird übereinstimmend bestätigt und betont (u.a. Schmitt et al. 2004; Erskine et al. 2006; Adeyemo et al. 2008; Czickus 2014).
- Weitere Einzelschritte der DGM-Aufbereitung und DOM-Modellierung, wie der Gebäudeimplementierung, der Elimination von Brücken etc. oder Innenhöfen sind meist ohne nähere Detailangaben genannt.
- Zu der für die Senken- und Fließweggenerierung erforderlichen DGM-Glättung finden sich nur vereinzelte Hinweise. Niemann und Illgen (2011) erläutern diesen Schritt bezüglich seiner Auswirkungen auf die Fließwegcharakteristik und empfehlen den Vergleich abgestufter Glättungsvarianten mit recht hohen Schwellenwerten (25 cm, 50 cm oder 100 cm). Der damit verbundene Einfluss auf die Senkenverteilung wird nicht thematisiert.
- Bei statischen Volumenbetrachtungen ist über die Mitbilanzierung des Abflussbeitrags der Kanalisation zu entscheiden, welche maßgeblich von der Stärke des Bezugsereignisses und Zielsetzung der topografischen Gefährdungsanalyse abhängt. Nichler et al. (2011) empfehlen eine angemessene Würdigung des Kanaleinflusses bei Ereignissen mit $T_n < 50$ a, ohne dies näher zu beschreiben. Kluck et al. (2010) und Czickus (2014) postulieren übereinstimmend, dass über die Kanalisation ein 2-jährliches Starkregenereignis überstaufrei abgeführt wird und deshalb die zugehörige Niederschlagshöhe pauschal abgezogen werden kann (z. B. 20 mm/h, siehe Kluck et al. 2010).
- Der Vollfüllungseffekt von „Zwischensenken“ entlang der Hauptfließwege wird nicht näher untersucht bzw. es wird von einer kategorischen Vollfüllung dieser Senken ausgegangen (Nichler et al. 2010).

2.3.2 Vulnerabilitäts- und Schadenspotenzialanalyse

2.3.2.1 Indikatorbasierte Vulnerabilitätsanalyse

Die ersten Vulnerabilitätsanalysen wurden im Kontext **Hochwasser** (*fluvial floods*) bereits in den 1970er Jahren in Großbritannien und den USA durchgeführt, wobei dabei zunächst die Entscheidungsunterstützung für technische Schutzmaßnahmen und deren Wirtschaftlichkeit im Vordergrund stand. Inzwischen hat sich die Fragestellung der Bewertung von Vulnerabilitäten durch die Einbindung in ein integrales Risikomanagement deutlich ausgeweitet, weil nun auch neben physischen Vulnerabilitätsfaktoren auch ökonomische, sozio-kulturelle und ökologische Aspekte mitbetrachtet werden sollen. Dies macht den Evaluierungsprozess zu einer multi-lateralen Aufgabe, die weit über Kosten-Nutzen-Betrachtungen hinausgeht (Barroca et al. 2006).

Wie beschrieben, lässt sich Vulnerabilität nicht adäquat anhand von messbaren Parametern quantifizieren. Daher basieren Vulnerabilitätsanalysen auf einer systematischen Definition und Auswahl geeigneter Indikatoren, die als Ersatz- oder Stellvertretergrößen eine qualitative Abschätzung und Bewertung ermöglichen, ohne dass sie direkt messbar sind (BBK 2013). Es hat sich methodisch bewährt, die Einflüsse aller Einzelindikatoren als „Vulnerabilitätsindex“ mathematisch zusammenzufassen, der als normierte Kennzahl eine relative Vergleichsbasis für verschiedene Anwendungsfälle und Untersuchungsgebiete darstellt. Beispiele mit unterschiedlichen Anwendungsbezügen zu Hochwasser (Flusshochwasser, Sturmfluten, Wirbelstürme) sind u. a. in (Connor und Hiroki 2005; Balica et al. 2009; Sebald 2010; Villordon und Gourbesville 2014) beschrieben und werden vorliegend nicht näher vorgestellt. Die darin ausgewählten Indikatoren beziehen sich zum einen auf verschiedene Vulnerabilitätskomponenten (hydrogeologisch, sozio-kulturell, ökonomisch, etc.) und zum anderen auf die Exposition und die Anfälligkeit als vulnerabilitätsfördernde Faktoren sowie auf die „Resilienz“ als vulnerabilitätsmindernder Faktor (eher „Anpassungskapazität“, vgl. Abschnitt 2.1.2).

Als Bezugsebene der Analyse werden entsprechend der Fragestellung Hochwasserrisiko meistens die Siedlungsräume ganzer Flussgebiete gewählt, es sind jedoch auch kleinere Einheiten, wie z. B. Gewässerteileinzugsgebiete oder urbane Gesamträume (Stadtgebiete) möglich. Nach dieser Bezugsebene ist auch bezüglich der Relevanz und Auswahl der Indikatoren zu differenzieren. Barroca et al. (2006) stellen ein entsprechendes Anwendungstool zur fallspezifischen Festlegung von Indikatoren vor. Von den zu überprüfenden Indikatoren ist in der Regel ein erheblicher Anteil methodisch nicht verwertbar, weil entweder aufgrund der fallspezifischen Eigenschaften des Untersuchungsgebiets die Relevanz nicht gegeben ist oder weil keine ausreichende Datenmenge und –güte zur Quantifizierung vorliegt (Connor und Hiroki 2005; Balica et al. 2009; Balica et al. 2012).

Bei der Entwicklung eines Bewertungsindex bedarf es neben der Identifikation, Auswahl und Quantifizierung der Indikatoren auch gesonderter Überlegungen zur Skalierung und Gewichtung der Indikatoren untereinander, da diese Schritte maßgeblich den Bewertungsindex beeinflussen (Mohr 1993, zitiert in Cendrero und Fischer 1997).

Für den Anwendungsfall **urbane Sturzfluten und Starkregenüberflutungen** (*pluvial floods*) wurde im Rahmen des Projekts „Kritische Infrastruktur, Bevölkerung und Bevölkerungsschutz im Kontext klimawandelbeeinflusster Extremwetterereignisse (KI-BEX)“ eine Verwundbarkeitsanalyse am Fallbeispiel Wuppertal entwickelt und durchgeführt (BBK 2013). Die Methodik baut ebenfalls auf den drei Vulnerabilitätsfaktoren Exposition, Anfälligkeit und Bewältigungskapazität im Sinne der Vulnerabilitätsdefinition nach UNISDR (2004a) auf und definiert hierfür Themenfelder, die über geeignete Indikatoren und erweiterte Kriterien eine Abschätzung der Verwundbarkeit ermöglichen (siehe Tabelle 2-8). Während Indikatoren ausreichend gut quantifizierbar sind, beschreiben Kriterien nur qualitative Zusammenhänge, u. a. weil eine adäquate Datengrundlage fehlt. Die Methode sieht zudem keine Differenzierung der Verwundbarkeit nach unterschiedlichen Dimensionen (physisch, sozio-kulturell, etc.) vor.

Das Fallbeispiel Wuppertal verdeutlicht, dass die Verwendung von Indikatoren und Kriterien zur räumlich differenzierten Bewertung der Verwundbarkeit privater Haushalte und Einzelobjekte sehr schwierig ist. Einerseits ist oftmals die Datengrundlage nicht ausreichend differenziert vorhanden (z. B. Kenntnis über Rückstausicherungen, bauliche Details, Versicherungsdichte). Andererseits sind die Expositionslagen räumlich stark differenziert und es existieren objektbezogen unterschiedliche Betroffenheiten. Beides mindert erheblich die Aussagekraft bei einer summarischen Bewertung der Verwundbarkeit auf Stadtquartiersebene. Es wird jedoch folgerichtig darauf hingewiesen, dass mit den verfügbaren Informationen Einzelfallbetrachtungen für Objekte mit gesonderter Risikolage, wie z. B. überflutungssensible Einrichtungen mit Unterkellerung, möglich und sinnvoll sind (BBK 2013).

Tabelle 2-8: Themenfelder, Indikatoren und Kriterien zur Abschätzung der Verwundbarkeit der Bevölkerung gegenüber Starkregenereignissen (nach BBK 2013)

	Themenfelder	Indikatoren	Erweiterte Kriterien
Exposition	<i>Topografische Senken</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bevölkerung in exponierten Räumen</i> 	<i>./.</i>
Anfälligkeit	<i>Körperliche Anfälligkeit</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Senioren; allein lebende Senioren</i> • <i>Kleinkinder</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Mobilitätseingeschränkte Personen</i>
Bewältigungskapazität	<i>Angemessenes Verhalten (Risikowahrnehmung)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Sprachkenntnisse</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Informationsgrad</i>
	<i>Ressourcen zur Schadensvermeidung oder -behebung</i>	<i>./.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bauliche Vorkehrungen</i> • <i>Elementarschadenversicherung</i>

Auf weitere indikatorbasierte Vulnerabilitätsanalysen für Starkregenüberflutungen (Hauger et al. 2006; Caradot et al. 2011) wird in Abschnitt 2.3.3 eingegangen, weil sie methodisch stärker auf eine differenzierte Betrachtung aller Risikokomponenten abzielen und quasi als Risikoanalysen anzusehen sind. In diesem Zusammenhang ist erkennbar, dass es Interpretationsspielräume bei der Deklaration der Methoden als „Vulnerabilitätsanalyse“ oder „Risikoanalyse“ gibt, je nachdem, wie Begriffsdefinitionen gewählt wurden und wie insbesondere die Exposition methodisch implementiert ist. Denn durch die Verarbeitung der Exposition als Vulnerabilitätsfaktor oder -komponente, wie in den oben genannten Beispielen geschehen, erübrigt sich der weitere Schritt der Überlagerung von Gefährdung und Vulnerabilität zur „Risikoanalyse“.

2.3.2.2 Resilienzbewertungen

Resilienzbewertungen für Überflutungen erfolgen sehr oft als Beitrag oder Komponente von Vulnerabilitätsanalysen oder gar Risikobetrachtungen (siehe Abschnitt 2.3.3.1). Der Betrachtungsschwerpunkt liegt dabei in der Regel auf der Stadtgebietsebene oder höher und deckt überwiegend den Hochwasserfall mit großräumigen und langandauernden Überflutungszuständen ab (Balica et al. 2009; Villordon und Gourbesville 2014). Insofern ist die Übertragbarkeit dieser Ansätze sehr begrenzt.

Ein detaillierterer Ansatz wird von Batica und Gourbesville (2014) im Zuge des Projektes CORFU (CORFU 2014) vorgestellt. Anhand des „flood resilience index (FRI)“ wird die Integration einer indikatorbasierten Resilienzbewertung in das Risikomanagement für Überflutungen vorgeschlagen. Der FRI wird auf insgesamt vier ver-

schiedenen Betrachtungsebenen vom Stadtgebiet bis zur Flurstücks- und Gebäudeebene am Fallbeispiel von Nizza ermittelt. Die verwendeten Indikatoren wurden nach Relevanz, Sensitivität, Verfügbarkeit und Erschwinglichkeit der Informationsbeschaffung festgelegt.

Vorliegend wird nur auf die qualitative Bewertung des FRI auf Gebäudeebene näher eingegangen. Hierfür werden externe und interne Abhängigkeiten von „urbanen Funktionen“ als Indikatoren pauschal anhand eines Verfügbarkeitslevels von 0 (Totalausfall) bis 5 (volle Verfügbarkeit) bewertet, dabei zusätzlich gewichtet. Der Verfügbarkeitsgrad drückt dabei die Resilienz in Form eines Leistungsgrades bzw. Schwere des Ausfalls aus. Zu den externen Funktionen zählen dabei die Elektrizitätsversorgung, die Wasserversorgung, die Abwasser- und Abfallentsorgung sowie die Verkehrsanbindung (Erreichbarkeit des Objekts bei Überflutung). Als interne urbane Funktionen werden beispielsweise die Aufrechterhaltung der Nahrungsversorgung oder bauliche Einzelheiten zum Wasserzutritt geführt.

Es wird nicht näher dargelegt, in welchem Umfang die FRI-Bewertung für Einzelobjekte im Anwendungsbeispiel Nizza ermittelt wurde, zudem fehlen nähere Angaben zur Festlegung der Gewichtungen. Die Autoren verweisen jedoch auf die Abhängigkeit des FRI von subjektiven Annahmen und Festlegungen.

2.3.2.3 Schadenspotenzialanalysen

Bei der Schadenspotenzialanalyse, wie sie beispielsweise auch das Merkblatt DWA-M 119 empfiehlt, wird im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Vulnerabilitätsanalysen stärker auf die Schadensanfälligkeit der Risikoobjekte (Gebäude, Infrastrukturen) fokussiert, während der Expositionsbeitrag erst im Zuge der anschließenden Überlagerung mit der Gefährdung zum Tragen kommt.

Grundsätzlich ist bei der Schadenspotenzialanalyse methodisch und bezüglich Genauigkeiten und Aussagetiefen zwischen flächendeckenden, gebietsweiten Analysen und objektbezogenen Detailanalysen zu unterscheiden (DWA 2016). Aufgrund allgemein fehlender Datengrundlagen und einer begrenzten Informationsverfügbarkeit ist es insbesondere bei der flächenbezogenen Analyse erforderlich, sich auf qualitative Angaben und Aussagen zu beschränken. Die standardisierte Ermittlung potenzieller monetärer Schäden, wie sie bei der Bewertung von Hochwasserschäden über höhenabhängige Schadensfunktionen eingesetzt werden, sind in der Regel nicht auf Starkregenüberflutungen übertragbar bzw. es fehlt hierfür derzeit noch eine ausreichend verlässliche Datengrundlage (DWA 2016, S. 34).

Die flächenbezogene Analyse liefert eine grobe, gebietsweite Einschätzung des Schadenspotenzials von Gebäuden, sonstigen Risikoobjekten (z. B. unterirdische Zugänge, Tiefgaragenzufahrten) und optional auch von Flurstücksflächen. Dazu werden primär Nutzungsinformationen zu Gebäuden und Flächen, wie sie in der Regel über das amtliche digitale Liegenschaftskataster (ALKIS®) verfügbar sind, verwendet und hinsichtlich ihres „mittleren Schadenspotenzials“ pauschal klassifiziert. Es können

darüber hinaus aber auch noch weitere, schadensrelevante Informationen (Untergeschosse, Einwohnerdichte, gewerbliche Besonderheiten, etc.) integriert werden. Eine qualitative Einstufung des Schadenspotenzials in wenige verbale Klassen von „gering“ bis „sehr hoch“ wird im Sinne einer flächendeckenden Ersteinschätzung als ausreichend aussagekräftig angesehen (DWA 2013b; Schmitt und Scheid 2014; DWA 2016) und ist in verschiedenen Anwendungsbeispielen dokumentiert (u. a. Nichler et al. 2010, Niemann und Illgen 2011, RISA 2014, Schmitt und Scheid 2014).

Detaillierte Analysen werden für Einzelobjekte, vorzugsweise solche, die einer signifikanten Überflutungsgefährdung ausgesetzt sind, durchgeführt. Sie sind aufwändiger, weil sie neben der Nutzungsart auch objektspezifische Besonderheiten (Gestaltungs- und Nutzungsdetails, Höhenlagen, Inventar, etc.) mit berücksichtigen. Hierfür müssen jedoch entsprechende Informationen verfügbar sein oder gesondert erhoben werden. Sofern vorhanden, kann der vom HochwasserKompetenzCentrum Köln entwickelte Hochwasserpas (HKC o.J.) zur Objektbewertung herangezogen werden.

Mit dem Anspruch einer einfach durchführbaren Risikoabschätzung für Starkregenüberflutungen stellt die flächenbezogene Analyse des Schadenspotenzials ein geeignetes Standardwerkzeug zur qualitativen Erstbewertung potenzieller Überflutungsschäden dar. Allerdings finden sich in den Umsetzungsbeispielen oftmals keine konkreten Hinweise auf die Festlegungsgrundlage der Klassifizierung, die somit in hohem Maße die subjektive Einschätzung des Bewertenden darstellt. Dabei lässt sich dieser Ansatz durch die Implementierung geeigneter schadensrelevanter Einflussfaktoren zu einem indikatorbasierten Bewertungsprozess erweitern und so die Objektivierung der Bewertung verbessern. Für die Indikatoreignung sind, wie oben beschrieben, die fallspezifischen Randbedingungen, konkret die Relevanz der Einflussfaktoren sowie deren Datengüte und –verfügbarkeit, sorgsam zu bewerten (Scheid et al. 2013; RISA 2014). Dieser Ansatz wird vorliegend weiterentwickelt und konkret untersucht (Abschnitt 6).

2.3.3 Risikoanalyse und Risikobewertung

2.3.3.1 Indikatorbasierte Risikoanalyse und -bewertung

Die in Abschnitt 2.3.2.1 erläuterten Vulnerabilitätsanalysen lassen sich methodisch vergleichbar auch zu indikatorbasierten Risikoanalysen und –bewertungen erweitern. Hierzu werden je nach gewählter Risikodefinition (vgl. Tabelle 2-6) zusätzliche Indikatoren der Überflutungsgefährdung implementiert und verarbeitet. Hauger et al. (2006) schlagen für die Risikobewertung überlasteter urbaner Entwässerungssysteme extremwertstatistische Niederschlagsinformationen und Überstaustatistiken als Gefährdungsindikatoren vor, die mit baulichen Gebäudedetails (Baumaterialien, Architektur) als Vulnerabilitätsindikatoren kombiniert werden. Die konkrete Quantifizierung der Indikatoren anhand eines Anwendungsbeispiels ist nicht dokumentiert.

Es wird jedoch auf die Bedeutung dieses Arbeitsschritts zur Vorbereitung eines Risikomanagements und der damit einhergehenden Risikokommunikation verwiesen, indem eine klare und objektive Beschreibung der Risikolage anhand der Indikatoren erleichtert wird. Zu deren Verwaltung, Visualisierung und Verarbeitung bietet sich der Einsatz von GIS-Werkzeugen an. Während die Gefährdungsbewertung einen eher allgemein gültigen Charakter mit guter Übertragbarkeit auf andere Anwendungsgebiete hat, sind Vulnerabilitätsbewertungen stets fall- und objektspezifisch vorzunehmen. Darüber hinaus werden die Handlungsspielräume bezüglich der Risikokomponenten sehr unterschiedlich eingeschätzt: Während sie auf der Gefährdungsseite bzw. bei auftretenden Naturgefahren begrenzt sind, können sie seitens der Vulnerabilität objektspezifisch zu deren Reduzierung größer sein (Hauger et al. 2006).

In ähnlicher Weise, jedoch einem anderen Risikoansatz entsprechend (siehe Tabelle 2-6, Nr. 5), weisen Caradot et al. (2011) Indikatoren der Gefährdungswahrscheinlichkeit, der Gefährdungsintensität, der Vulnerabilität und des Expositionsgrads (Anzahl der exponierten Risikoelemente bzw. Personen) aus. Der Fokus liegt hierbei jedoch auf der Überlastung der Entwässerungselemente bei häufigeren Starkregeneignissen (Kanalnetzüberstau, Verlegung von Einlaufbauwerken, etc.). Die Methodik sieht Stakeholder-Befragungen zur quantitativen Bewertung der einzelnen Indikatoren anhand eines Punktesystems vor. So werden beispielsweise den verschiedenen Risikoobjekten anhand ihrer jeweiligen Nutzung auf Flächen- und Gebietebezug Vulnerabilitätswerte (Vulnerabilitätsrate V) zugewiesen, die sich aus einer relativen Rangfolge aller Einzelbewertungen ergeben („Spielkarten-Methode“ nach Pomerol und Barba-Romero 2000). Die Anwendung dieser indikatorbasierten Risikobewertung wird an den zwei Fallbeispielen Lyon und Mulhouse erprobt, für die eine ausreichend breite Datengrundlage an historischen Überflutungs- und Schadensfällen durch Kanalnetzüberlastung vorliegt. Die Ergebnisse der Risikobewertung werden jeweils als Risikodichteverteilung in stadtgebietsweiten Karten visualisiert. Die Fallbeispiele belegen aus Sicht der Autoren, dass eine zuverlässige Risikobewertung anhand der vorgestellten Methodik möglich ist. Sie zeigen jedoch auch starke methodische Abhängigkeiten, einerseits von der Zuverlässigkeit und Güte der erfassten Überflutungsdaten und andererseits von den Gewichtungen der einzelnen Indikatoren und Risikofaktoren, die maßgeblich den finalen Risikowert bestimmen (Caradot et al. 2011). Es ist ferner anzumerken, dass die produzierten Risikokarten stadtgebiets- bzw. stadtteilweite Übersichtskarten zur kanalinduzierten Überflutung darstellen und nicht einzelobjektscharf aufgelöst sind.

2.3.3.2 Empfehlungen des technischen Regelwerks

Die Empfehlungen des Merkblatts DWA-M 119 (DWA 2016) umfassen eine vereinfachte und eine detaillierte Vorgehensweise zur Risikobewertung. Damit wird gewürdigt, dass die Ergebnisse von Gefährdungs- und Schadenspotenzialanalyse unterschiedliche Aussagetiefen aufweisen, weil die Qualität der Datengrundlage zur Bewertung der potenziellen Überflutungsschäden deutlich hinter derjenigen der Gefährdungsanalyse, unabhängig von der eingesetzten Methode, zurück bleibt.

Bei der vereinfachten Risikobewertung ist es ausreichend, anhand der in der Gefahrenkarte ausgewiesenen Wassertiefen die Gebäudebetroffenheit zu kennzeichnen und mit dieser „Expositionskarte“ anschließend die Gebäude hinsichtlich ihrer Schadenspotenziale und damit verbunden ihres Überflutungsrisikos pauschal zu bewerten. Da der Schwerpunkt der „vereinfachten Risikobewertung“ nach DWA-M 119 auf der Identifikation und Lokalisierung der Überflutungsrisiken liegt und eine Bewertung anhand des Schadenspotenzials erst anschließend erfolgt, wäre die Bezeichnung Risikoanalyse hier zutreffender.

Bei der detaillierten Risikobewertung wird das Schadenspotenzial flächendeckend für das Gesamtgebiet bewertet und in Kombination mit der Überflutungsgefahr im Kartenwerk visualisiert. Es sollte jedoch entsprechend der Aussagegüte der Schadenspotenzialbewertung differenziert werden: Die Kartendarstellung des Überflutungsrisikos als Resultat einer Überlagerungsmatrix von Gefahr und Schadenspotenzial (differenziert nach verschiedenen Niederschlagsbelastungen) wird nur bei hinreichend genauer Schadenspotenzialbewertung empfohlen. Ansonsten sollte die Darstellung der Risikokarte auf die Überflutungsgefahren (Wassertiefen) und Schadenspotenzialklassen der Gebäude beschränkt bleiben (DWA 2016). Weitere Ausführungen hierzu finden sich in Abschnitt 7.1.

Das Merkblatt DWA-M 119 gibt keine konkreten Hinweise, bei welcher Aussagetiefe von einer „hinreichend genauen“ Schadenspotenzialbewertung auszugehen ist und überlässt diese Festlegung dem sachkundigen Bearbeiter. Unabhängig davon wird empfohlen, wichtige neuralgische Punkte, für die eine gesonderte Prüfung des Überflutungsrisikos angezeigt ist, im Kartenwerk zu hervorzuheben. In jedem Falle ist es ratsam, die Planung von Vorsorgemaßnahmen nicht allein auf Grundlage der wie auch immer erzeugten Risikokarte durchzuführen, sondern stets die Informationen der Gefahrenkarte parallel mit zu nutzen. Diese Weiterverarbeitung der Risikoinformationen erfolgt im Zuge des Risikomanagements, das nachfolgend näher beschrieben wird.

2.4 Starkregenerisikomanagement

2.4.1 Grundlagen des Risikomanagements

Die Aufgaben eines Risikomanagements widmen sich allgemein dem bestmöglichen Umgang einer Organisation oder eines Systems mit Risiken. Entsprechend der aufgezeigten Vielfalt an Risikodefinitionen und Anwendungsbezügen existiert auch ein breites Spektrum unterschiedlicher Definitionen des Begriffs Risikomanagement. Eine umfassende Übersicht hierzu und zum Umgang und Management von Risiken liefert beispielsweise (IRGC 2005).

Eine grundsätzliche, allgemeine Definition liefert die Norm ISO 31000:2009, die Risikomanagement als „Koordinierte Aktivitäten zur Lenkung und Steuerung einer Organisation in Bezug auf Risiken“ ansieht (ISO 2009). Risiken werden darin wertneutral als „die Auswirkungen von Unsicherheit auf Ziele“ angesehen. Die Definition findet damit insbesondere eine breite Anwendung auf ökonomische Prozesse, beispielsweise für unternehmerische Entscheidungen. Zum Einstieg werden mit dem „Erstellen des Zusammenhangs“ (*establish the context*) zunächst die Organisationsziele, die Risikokriterien und die zu berücksichtigenden internen und externen Einflussfaktoren definiert. Kern des Risikomanagementprozesses stellt jedoch die Risikobeurteilung (*risk assessment*) dar, die die Abfolge von Risikoidentifikation (*risk identification*), Risikoanalyse (*risk analysis*) und Risikobewertung (*risk evaluation*) umfasst (Abbildung 2-7).

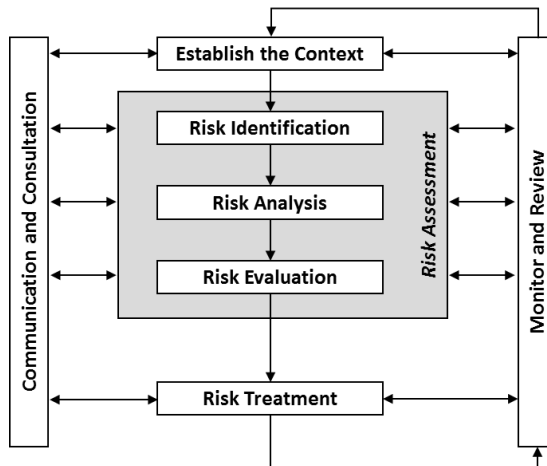


Abbildung 2-7: Risikomanagementprozess nach ISO 31000:2009 (verändert nach Purdy 2010)

Die Risikoidentifikation dient dem Erkennen bzw. Bewusstwerden von Risiken und beantwortet die Frage „Was kann wann, wo, wie und weshalb passieren?“. Darauf aufbauend vertieft die Risikoanalyse das Risikoverständnis („weshalb“) und beleuchtet eingehender die Risikokausalitäten, Entstehungsursachen, Einflüsse, Ausprägungen und Charakteristika. Hierbei sind in Form von qualitativen und quantitativen Analysen unterschiedliche Detaillierungsgrade möglich. Darauf aufbauend erfolgt die Risikobewertung, bei der im Kern die Risikotoleranz und -akzeptanz beurteilt wird. Die damit verbundene Fragestellung „Was darf bzw. darf nicht passieren?“ lässt sich nicht pauschal beantworten. Erst anhand einer kombinierten Bewertung der Eintrittshäufigkeit und des Ausmaßes von (negativen) Konsequenzen eines Prozesses kann entschieden werden, ob ein Risiko akzeptabel, unter Anpassungsmaßnahmen tolerierbar oder nicht tolerierbar ist, auch wenn die Entscheidungsgrenzen oftmals nicht klar definierbar oder einzelfallabhängig sind (siehe hierzu u. a. IRGC 2005). Darüber hinaus umfasst die Risikobewertung neben der Festlegung von Sicherheitsvorgaben auch die Entscheidungsfindung über Notwendigkeit, Umfang und Prioritäten von Maßnahmen der Risikosteuerung (*risk treatment*). Diese setzt auf den Ergebnissen der Risikobeurteilung auf und beinhaltet die Auswahl, Durchführung und Wirksamkeitsbeurteilung diverser Handlungsoptionen und Maßnahmen zur Reduzierung der Risiken als zyklischen Prozess².

Der Risikomanagementprozess wird zudem von den beiden Rahmenprozessen „Überwachung und Überprüfung“ (*monitor and review*) sowie „Kommunikation und Konsultation“ (*communication and consultation*) kontinuierlich begleitet. Dies gewährleistet zum einen eine kontinuierliche Leistungsüberprüfung der Teilprozesse und Qualitätssicherung. Zum anderen ist eine adäquate, zielgruppenorientierte Kommunikation der einzelnen Akteure und Stakeholder mit Verständigung auf die erforderlichen Schritte und Maßnahmen von immanenter Bedeutung für den Gesamterfolg eines integralen, präventiven Risikomanagements (Krieger und Schmitt 2015). Dies gilt in besonderer Weise auch für das Risikomanagement von Starkregenüberflutungen.

2.4.2 Anwendungskontext Hochwasser- und Starkregenüberflutungen

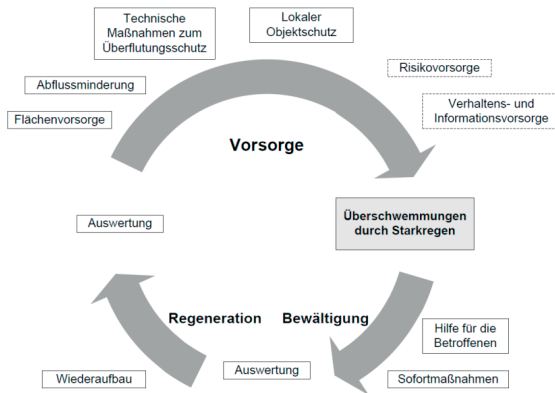
In Bezug auf Naturgefahren existieren auch alternative Definitionen von Risikomanagement und eine alternative begriffliche Abgrenzung zum Risiko-Assessment. So kann Risikomanagement auch als stärker eingegrenzten Teilprozess innerhalb des Risiko-Assessments aufgefasst werden, der den Prozessen Risikoidentifikation und -analyse nachgeschaltet ist (Hollenstein 1996; Glade 2003).

² Der ökonomisch geprägte Terminus „Risikosteuerung“ suggeriert möglicherweise ein sehr hohes Maß an zielgerichteter Einflussnahme und Handlungsoptionen. Dieses Maß kann in Anwendung auf Naturrisiken deutlicher limitiert sein als in anderen Risikofeldern. Dennoch gilt auch hier, dass durch „Risikosteuerung“ im Sinne einer Risikominderung eine allgemein akzeptierte Gesamtrisikosituation angestrebt und erzeugt wird.

Dennoch ist die Definition des Risikomanagementprozesses nach ISO 31000:2009 in wesentlichen Zügen sowohl auf Hochwasserrisiken als auch Überflutungsrisiken bei Starkregen übertragbar und in diesem Themenfeld auch erkennbar. Zum einen zeigt dies die Neufassung der Euronorm EN 752 (CEN 2017), deren deutsche Fassung DIN EN 752 „Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden – Kanalmanagement“ Risikomanagement als Summe der möglichen Einzelprozesse Risikoidentifikation, Risikoanalyse, Risikobewertung und Risikobehandlung auffasst (DIN 2017). Zum anderen entspricht die Grundkonzeption der Europäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRM-RL 2007) ebenfalls dieser Vorgehensweise. Auch wenn im Gegensatz zum „Hochwasser“ der Begriff „Risikomanagement“ in der Richtlinie nicht explizit definiert ist, umfassen ihre Vorgaben alle Elemente und Leistungsphasen des Risikomanagements. Die (vorläufige) Bewertung des Hochwasserrisikos, die Darstellung von Gefahren- und Risikokarten und die anschließende Erstellung von HWRM-Plänen (HWRM-RL 2007) wurden von der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) in eine Risikomanagementstrategie überführt, die eine zyklische Abfolge von Maßnahmen der Vorsorge, Bewältigung und Regeneration vorsieht (LAWA 2010b).

Konzeptionell lässt sich aufgrund der thematischen Nähe und gleichen Zielsetzung das Risikomanagement gemäß HWRM-RL der HWRM-Zyklus der LAWA auf Starkregenüberflutungen übertragen (DWA 2016, siehe Abbildung 2-8a), wenn gleich einige Komponenten an die Randbedingungen von Starkregenüberflutungen anzupassen und die Besonderheiten dieses Lastfalls gegenüber Hochwasserereignissen zu berücksichtigen sind (u.a. Schmitt und Worreschk 2011; LUBW 2016). Das zwischenzeitlich vorliegende LAWA-Strategiepapier für ein effektives Starkregenerisikomanagement (LAWA 2018) betont ebenfalls das Erfordernis, das Starkregenerisikomanagement aufbauend auf dem Hochwasserrisikomanagement zu entwickeln.

Es stellt ohnehin eine nationale Auslegungsbesonderheit hinsichtlich des geltenden Rechtsrahmens dar, dass Starkregenüberflutungen in Deutschland bislang nicht als „Hochwasser“ im Sinne der HWRM-RL angesehen werden. Zwar lässt sich die Begriffsdefinition nach HWRM-RL bzw. § 72 WHG (WHG 2009) auf oberflächige Starkregenüberflutungen (sofern ohne Kanalnetzüberstau) ohne weiteres anwenden (vgl. Krieger und Schmitt 2015; LUBW 2016). Allerdings kommt die LAWA zu der abschließenden Einschätzung, dass das Risiko von Starkregenüberflutungen als „generelles Risiko, aber nicht als signifikantes Hochwasserrisiko im Sinne des § 73 Abs. 1 WHG“ einzustufen ist (LAWA 2017). Es existiert somit bislang auch noch keine gesetzliche Verpflichtung zur Bewertung von Überflutungsrisiken, Erstellung von Starkregengefahrenkarten und –risikokarten sowie zur Erarbeitung zugehöriger Risikomanagementpläne entsprechend §§73 bis 75 WHG.



(a) nach Schmitt und Worreschk (2011)



(b) nach Illgen (2016), verändert

Abbildung 2-8: Darstellungsvarianten Risikomanagement Starkregen und Sturzfluten

Dies mag mit dazu beigetragen haben, dass die Entwicklung und Etablierung des Risikomanagements für Starkregenüberflutungen in Deutschland noch nicht sehr weit fortgeschritten ist. Es ist Resultat des Umdenkens und der Neuausrichtung in der Siedlungsentwässerung zur Bewältigung der Überflutungsvorsorge, die als risikoorientierte und interdisziplinäre, kommunale Gemeinschaftsaufgabe zu begreifen und lösen ist (vgl. Schmitt 2011; DWA 2013b). So hat man sich erst in den letzten Jahren, meist motiviert aufgrund negativer Erfahrungen durch schadensträchtige Ereignisse, verstärkt mit urbanen Überflutungsrisiken durch Starkregen jenseits der Bemessungsgrenzen auseinandergesetzt und die Entwicklung und Etablierung systematischer Gefährdungs- und Risikoanalysen vorangetrieben (Illgen 2013; Krieger und Schmitt 2015). Auch sind mehrere Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu

diesem Themenfeld auf verschiedenen Ebenen bearbeitet worden, meist in enger Verknüpfung und synergetischer Betrachtung mit Fragestellungen des Anpassungsbedarfs an den Klimawandel oder der Wassersensiblen Stadtentwicklung. Exemplarisch seien hierzu die Projekte RISA („RegenInfraStrukturAnpassung Hamburg“, RISA 2015), „KlimaAnpassungsStrategie Extreme Regenereignisse - KLAS“ (Koch et al. 2015), „Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung“ (BBSR 2015) oder die SUDPLAN-Pilotstudie Wuppertal (Sander et al. 2011) genannt.

Der gesamte Entwicklungsprozess manifestiert sich schließlich in der Fortschreibung des technischen Regelwerks als Merkblatt DWA-M 119 (DWA 2016), in diversen praxisbezogenen Handlungsempfehlungen und Leitfäden (u. a. DWA 2013b; DST 2015; Kommunal Agentur NRW GmbH 2015) sowie einem ersten Förderprogramm auf Länderebene (Baden-Württemberg) für die Erstellung kommunaler Starkregengefahrenkarten als Einstieg ins Risikomanagement (LUBW 2016).

Die inzwischen von der LAWa auf Beschluss der 86. Umweltministerkonferenz ausgearbeitete „Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement“ (LAWa 2018) belegt, dass inzwischen auch auf politischer Ebene dem Erfordernis Rechnung getragen wird, sich mit den Risiken aus Starkregenüberflutungen und Sturzfluten fernab der Fließgewässer verstärkt auseinander zu setzen und wirksame, ganzheitliche Anpassungs- und Vorsorgemaßnahmen auf kommunaler Ebene zu entwickeln.

Es sind zwei Besonderheiten des Risikomanagements für Starkregen gegenüber der Darstellung nach ISO 31000:2009 erwähnenswert. Zum einen bedingt der Sachverhalt, dass Starkregenüberflutungen die Folgen statistisch wiederkehrender Naturgefahren darstellen, eine stärkere Betonung der zyklischen Prozessabfolge, wobei die Risikobehandlung, konkret die Vorsorgemaßnahmen für das nächste Ereignis, einen dominanten Stellenwert aufweisen, wie sich beispielsweise auch in Abbildung 2-8 (b) zeigt. Zum anderen ergibt sich aus dem Charakter der Aufgabenstellung der Überflutungsvorsorge und dem Erfordernis der disziplinenübergreifenden Zusammenarbeit verschiedener Akteure (Stichwort „kommunale Gemeinschaftsaufgabe“) die vorrangige Verpflichtung zur permanenten Risikokommunikation und Koordination aller Aktionen während des gesamten Risikomanagementprozesses. Die notwendige Kommunikation beginnt bei der zielgruppenorientierten Information über Gefahren und Risiken der Starkregenüberflutung zur erforderlichen Bewusstseins-schärfung. Sie ist ebenso unverzichtbar bei der Risikobewertung und Beantwortung der grundsätzlichen Frage, welche Überflutungsrisiken man bereit ist, in Kauf zu nehmen und welches Vorsorge- und Schutzniveau angestrebt wird. Schließlich begleitet bzw. fördert sie den gesamten Prozess der integralen Maßnahmenkonzeption und -realisierung (vgl. Geldof und Kluck 2008). Die Methoden und Instrumente der Risikokommunikation sind dabei ebenso zu unterscheiden wie die verschiedenen Adressaten auf kommunaler, privater und Medienseite (vgl. Krieger und Schmitt 2015).

2.5 Datengrundlagen der Gefährdungs- und Risikoanalyse

Je nach Methode der Überflutungsberechnung sind unterschiedliche Ansprüche an den Umfang und die Güte bzw. den Detaillierungsgrad der für die Prozessschritte erforderlichen Datengrundlage zu stellen. Als Datengrundlage werden unterschiedliche Daten, i. d. R. Geodaten problembezogen kombiniert.

Dieser Abschnitt behandelt nach kurzen Ausführungen zur allgemeinen Definition und den Arten von Geodaten die für Anwendungsfragestellungen der Überflutungsvorsorge verfügbaren und relevanten (Geo-)Datenbestände hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit, Informationsgüte und Einsatzmöglichkeiten. Der Fokus liegt dabei auf öffentlichen Daten, die i. d. R. von den Landesämtern für Vermessung oder kommunalen Institutionen erhoben, verwaltet und bereitgestellt werden können. Daten kommerzieller Anbieter oder Versicherungsdaten der Schadensregulierung werden nicht näher thematisiert.

2.5.1 Geodaten - Allgemeines und Definitionen

Unter dem Begriff **Geodaten** werden nach einer Definition von Bill (2010) alle Daten zur Beschreibung der Erdoberfläche und einzelner Objekte der Landschaft, z. B. Gegenstände, Geländeformen oder Infrastrukturen, zusammengefasst. Das Vorhandensein eines Raumbezugs ist als wesentliches Kennzeichen von Geodaten zwingend erforderlich, über den diese miteinander verknüpft werden können. Geodaten werden daher auch häufig als raumbezogene Daten bezeichnet. Mit dem Einsatz von Geografischen Informationssystemen (GIS) und deren Funktionalitäten, z. B. Abfragen und Auswertungen, lassen sich daraus wiederum neue Informationen zur Beantwortung diverser Fragestellungen generieren (Bill 2010).

Geodaten werden allgemein in die beiden Teilkomplexe Geobasisdaten und Geofachdaten (verkürzt: Fachdaten) unterschieden (Bill 2010). Der Teilbereich der **Geobasisdaten** umfasst alle als Katasterinformationen bezeichneten Daten, also die „Daten des amtlichen Vermessungswesens, welche die Landschaft, die Liegenschaften und den einheitlichen geodätischen Raumbezug anwendungsneutral nachweisen und beschreiben“ (AdV 2015b). Die Erhebung, Verwaltung, Aktualisierung und Bereitstellung der Geobasisdaten liegt als wesentliche Aufgabe des amtlichen Vermessungswesens in Zuständigkeit der Bundesländer, genauer in deren Fachverwaltungen (z. B. Landesvermessungsämter, -behörden, Landesbetriebe). Diese sind in der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) als föderalem Zusammenschluss organisiert und mit der zentralen Aufgabe der Harmonisierung und Vereinheitlichung fachlicher Angelegenheiten des Kataster- und Vermessungswesens betraut (AdV 2007).

Auf Grundlage der anwendungsneutralen Geobasisdaten operieren unterschiedliche, ebenfalls raumbezogene Fachanwendungen, die entsprechende **Geofachdaten** (Fachdaten) generieren, erheben oder auf diese zurückgreifen. Als Fachanwendungen seien beispielhaft die Hydrologie, Geographie, Demographie, Klimatologie oder auch Bodenkunde genannt. Fachdaten bedürfen einer steten Datenaktualisierung durch eine entsprechend leistungsfähige Geodateninfrastruktur (GDI). Die Anbieter von GIS-Produkten bieten hierfür Anwendungsmodule an, die meist als „Fachschaalen“ in entsprechenden Fachinformationssystemen eingebunden sind, so zum Beispiel die GIS-geführten Kanalkataster kommunaler Entwässerungsbetriebe.

Geodaten lassen sich hinsichtlich ihrer **Beschreibungsinhalte** in naturbeschreibende und artefaktbeschreibende Geodaten unterscheiden (Bill 2010), was weitestgehend der o. g. Unterscheidung von Geobasis- und Fachdaten entspricht. Danach sind Geobasisdaten als naturbeschreibende Geodaten aufzufassen, die natürliche Zustände und Prozesse auf der Erdoberfläche beschreiben oder bewerten, z. B. topographische, hydro(geo)logische, atmosphärische oder bodenkundliche Daten. Demgegenüber sind Geofachdaten aufgrund ihres anthropogenen Anwendungskontextes artefaktbeschreibend, weil sie Ergebnisse menschlicher Planungs- und Handlungsprozesse auf der Erdoberfläche beschreiben oder bewerten. Hierunter fallen beispielsweise Raumordnungs- oder Bauleitplanungsdaten, demographische oder verkehrsgeographische Daten sowie Wirtschafts- und Marktdaten (vgl. Bill 2010).

In ähnlicher Form wird bzgl. der **Datenherkunft und –erfassung** unterschieden. Originäre Geodaten resultieren aus der unmittelbaren, primären Datenerfassung am realen Objekt oder dessen unverarbeitetem Abbild, bspw. durch terrestrisch-topografische Vermessung oder Fernerkundung und Photogrammetrie. Abgeleitete Geodaten sind das Resultat einer zweckbezogenen, sekundären Datenerfassung, bei der eine bereits erfasste und aufbereitete Datengrundlage genutzt wird, wie z. B. bei der Digitalisierung von Karteninformationen oder Auswertungen von Statistiken. (vgl. Bill 2010; Hake et al. 2002). Abgeleitete Geodaten sind weit verbreitet und bilden häufig die Datenbasis von GIS-Fachanwendungen, so auch beispielsweise für topografische Gefährdungs- und Risikoanalysen für Starkregenüberflutungen.

Die Verwaltung und Verarbeitung von Geodaten in GIS erfolgt in den **Dimensionen** Geometrie, Topologie, Thematik und Dynamik (Bill 2010). Auf diese soll mit Ausnahme der Geometrie vorliegend nicht weiter eingegangen werden. Die geometrische Dimension unterscheidet zwischen 2D-Modellen (planimetrisch ohne Höhenangaben) bis hin zu 4D-Modellen (dreidimensionale Objekte mit x,y,z-Koordinaten und einem zusätzlichen Zeitbezug t). Die bei GIS-gestützten Gefährdungs- und Risikoanalysen verwendeten Digitalen Gelände- bzw. Höhenmodelle werden aus 3D-Punktwolken erzeugt, sind jedoch definitionsgemäß sogenannte 2,5D-Objekte. Die Abstufung der dritten Dimension drückt aus, dass der Höhenwert z als lageabhängige Information abgespeichert und den Flächenobjekten (x,y-Rasterdaten) als singulärer Attributwert zugewiesen ist (vgl. Bill 2010).

2.5.2 Geodatenverwaltung und -verarbeitung

2.5.2.1 Geodateninfrastruktur Deutschland (GDI-DE)

Eine moderne Informationsgesellschaft ist darauf angewiesen, dass die vielfältigen, raumbezogenen Informationen den unterschiedlichsten Nutzerebenen zur Aufgabebewältigung in Politik, Verwaltung, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft zugänglich gemacht werden. Für die Erfüllung dieser fundamentalen Aufgabe bedarf es einer Geodateninfrastruktur, die auch auf Europäischer Ebene mit der Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE-RL 2007) gefordert wird. Die INSPIRE-Richtlinie vom 15. Mai 2007 verpflichtet alle Mitgliedstaaten der Europäischen Union, standardisierte Dienste für die Suche, die Visualisierung und den Bezug von Daten bereitzustellen. Damit sollen Verfügbarkeit, Qualität, Organisation, Zugänglichkeit und gemeinsame Nutzung von Geodaten zu den Themen der INSPIRE-Richtlinie über verschiedene Verwaltungsebenen und Sektoren hinweg verbessert werden (GDI-DE 2010).

Auf nationaler Ebene widmet sich die Geodateninfrastruktur Deutschland (GDI-DE) der Umsetzung der INSPIRE-Richtlinie; sie geht im Hinblick auf nationale Anforderungen an eine Geodateninfrastruktur noch in Zweck und Umfang über die Umsetzung der INSPIRE-Richtlinie hinaus. Das Architekturkonzept der GDI-DE besteht aus den Komponenten Geodaten, Metadaten, Geodatendienste und Netze und definiert die einzusetzenden Technologien, Funktionen und anzuwendenden Standards. In der Nationalen Geodatenbasis (NGDB) als Kernbestandteil der GDI-DE sind für Deutschland die Geodaten mit definierten Qualitätsmerkmalen enthalten (GDI-DE 2010). Die AdV-Datengrundlagen (siehe Abschnitte 2.5.4 und 2.5.5) sind über das AdV-WMS-Applikationsprofil (AdV 2012) ebenfalls in die GDI-DE integriert.

2.5.2.2 Geo-Informationssysteme

Allgemein handelt es sich bei einem Geo-Informationssystem (GIS) um ein rechnergestütztes System, bestehend aus den vier Komponenten Hardware, Software, Daten und Anwendungen. Mit GIS können Geodaten „digital erfasst und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden“ (Bill 2010). Mit dem Begriff „GIS“ werden gleichermaßen Technologie, Produkte und Vorhaben zur Bereitstellung von Geodaten bezeichnet. Je nach Anwendungsgebiet kommen spezielle Ausprägungen von GIS zum Einsatz, z. B. als Kommunales Informationssystem (KIS) oder Fach-Informationssystem (FIS).

Die Leistungsfähigkeit und der praktische Nutzen geografischer Informationssysteme sind unmittelbar gekoppelt an die Angebotsbreite, Verfügbarkeit und Güte der bereit gestellten und verwalteten Geodaten. Daneben bedarf es effektiver und leistungsfähiger GIS-Funktionalitäten, um den Informationsgehalt der unterschiedlichen Geodaten nutzbar zu machen. In Analogie zur Verfahrenstechnik können Geo-

daten als „Rohstoff“ der GIS-Verarbeitung aufgefasst werden, die maßgeblich die Qualität der über GIS-Werkzeuge produzierten Informationen beeinflussen. Die zunehmende, breite Verwendung von GIS, insbesondere auch der tagtägliche Zugriff auf nutzeroffene, webbasierte GIS-Dienste, rückt unmittelbar die allgemeine Wahrnehmung und Bedeutung der verwalteten und bereit gestellten Geodatengrundlage in den Vordergrund.

Es existiert inzwischen eine breite Vielfalt an GIS-Produkten für die unterschiedlichsten Themen und Arbeitsfelder, teils kommerziell vertrieben, teils frei zugänglich (open source). Für den deutschsprachigen Raum sei auf die Marktübersicht der kommerziellen Anbieter von Harzer (2017) verwiesen.

Tabelle 2-9 gibt eine kompakte Übersicht ausgewählter GIS-Produkte, die insbesondere für die vorliegenden Fragestellungen der hydrogeologischen und topografischen Gebietsanalyse und Identifikation überflutungsgefährdeter Siedlungsbereiche (Senkenlagen und Fließwege) relevant sind und geeignete Werkzeuge beinhalten.

Tabelle 2-9: Ausgewählte GIS-Produkte mit Anwendungsbezug topografische Gefährdungsanalyse

Produkt	Typ	Quelle / Link ¹⁾
CatchmentSIM, Version 3.5.3 (Catchment Simulation Solutions)	kommerziell	http://csse.com.au/index.php/products/catchmentsim
DEMETER, Version 1.1 (Digital Elevation Models and their Elementary TERRain analysis)	Open source	(Bartak 2010)
ERSI ArcGIS Desktop Version 10.5	Kommerziell	http://www.esri.com/de/arcgis/products/arcgis-pro/
GRASS (Geographic Resources Analysis Support System)	Open source	https://grass.osgeo.org/
QGIS, Version 2.18	Open source	https://www.qgis.org/de/site/
SAGA (System for Automated Geoscientific Analysis)	Open source	http://www.sagagis.org/en/index.html
Whitebox GAT (Whitebox Geospatial Analysis Tools),	Open source	http://www.uoguelph.ca/~hhydroge/Whitebox/

¹⁾ Stand 01.03.2017

Da bei der vorliegenden Arbeit die methodischen Aspekte im Vordergrund stehen und weniger auf produkt- und werkzeugspezifische Besonderheiten und Optionen eingegangen wird, wurden die Untersuchungen exemplarisch mit der Anwendung ESRI ArcGIS 10.1 durchgeführt und auf alternative Anwendungen verzichtet.

2.5.3 AAA®-Modell

Mit dem sogenannten AAA®-Modell der AdV, auch AAA®-Fachschemata, werden die Geobasisdaten in Deutschland zu einem bundesweit einheitlichen Grunddatenbestand zusammengefasst, der digital und hinsichtlich seiner Inhalte und Strukturierung standardisiert ist. Die Bezeichnung des Fachschemas resultiert daraus, dass die drei Grunddatenbestände

- ATKIS® - Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
- ALKIS® - Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem und
- AFIS® - Amtliches Festpunktinformationssystem

zu einem Gesamtgrunddatenbestand der Geodaten des amtlichen Vermessungswesens zusammengeführt werden. Dies ermöglicht eine weitgehend redundanzfreie und damit wirtschaftliche Führung der Objekte des Liegenschaftskatasters und der Geotopographie (Seifert 2005; AdV 2007). Das Anwendungsschema setzt sich aus einem Basisschema und einem Fachschema zusammen. Das Basisschema formuliert fachneutrale, grundlegende Geo-Objekteigenschaften und kann damit als Grundlage für Fachinformationssysteme genutzt werden. Das Fachschema beschreibt die Gliederung von Objektklassen, Objektartgruppen, Objektarten und deren Attribute (siehe auch Abschnitt 2.5.5.1). Es umfasst die gesamten Informationen aus den Bereichen Liegenschaftskataster, Topographie/Kartographie und Grundlagenvermessung des amtlichen Vermessungswesens aller Bundesländer (AdV 2007). Alle Einzelheiten zum AAA®-Anwendungsschema sind in der „Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok)“ (aktuelle Version 7.0.2 vom 10.05.2015) umfassend beschrieben (AdV 2015c).

Die beiden Grunddatenbestände ATKIS® und ALKIS® sind als Informations- und Arbeitsgrundlage für die vorliegenden Fragestellungen unverzichtbar und werden daher in den nachfolgenden Abschnitten näher beschrieben.

2.5.4 Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS®)

2.5.4.1 Inhalt und Struktur

Mit dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem ATKIS® wurde von der AdV ein bundesweiter Beschreibungsstandard für die Geotopographie der Bundesrepublik Deutschland definiert, der „die öffentlich-rechtliche Datenbasis für rechnergestützte digitale Verarbeitungstechnologien und die geotopographische Raumbezugsbasis für die Anbindung und Verknüpfung mit geothematischen Fachdaten“ darstellt (AdV 2017b). ATKIS® besteht aus den in Tabelle 2-10 dokumentierten, nutzungsorientierten digitalen Erdoberflächenmodellen und stellt einen länderübergreifenden, öffentlich-rechtlichen Grunddatenbestand mit Mindestinhalten dar, die für die verschiedensten Nutzungen bereitzustellen sind. Die

Datenbestände der einzelnen Bundesländer können jedoch aufgrund länderspezifischer Besonderheiten und Anforderungen noch weitere Daten umfassen, die in jährlich fortgeschriebenen Produktblättern gelistet sind (AdV 2017b).

Von den beschriebenen ATKIS®-Inhalten sind für den Anwendungsbezug zur Überflutungsprüfung vor allem die digitalen Geländemodelle (DGM) und die digitalen Orthophotos (DOP) von Bedeutung. Die im DGM enthaltenen topografischen Informationen (Höhenwerte) bilden das Datenfundament der GIS-basierten Gefährdungsanalyse, auf dessen Grundlage oberirdische Fließwege und Senken lokalisiert werden. Digitale Orthophotos (DOP) werden zum einen als Informationsquelle für die Oberflächenbeschaffenheit (z.B. Art der Befestigung, Grad der Flächenversiegelung) herangezogen und erleichtern zum anderen die Ergebnisplausibilisierung im Rahmen der topografischen Gefährdungs- und Überflutungsanalyse. Beide Datengrundlagen werden gesondert nachfolgend beschrieben.

Tabelle 2-10: Dateninhalte des ATKIS® (AdV 2009)

ATKIS®- Erdoberflächenmodell	Erläuterung	Qualitätsabstufungen, Ausführungen (AdV 2009)
Digitale Landschaftsmodelle (DLM)	DLM bestehen aus dem Digitalen Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM, maßstablos) und daraus abgeleiteten Landschaftsmodellen verschiedener Maßstäbe. Die Zifferangabe der Bezeichnung steht für den Maßstab (z.B. DLM50 in Maßstab 1:50.000)	Basis-DLM, daraus: DLM50 DLM250 DLM1000
Digitale Geländemodelle (DGM)	DGM sind durch Interpolationsverfahren auf eine regelmäßige Rasterauflösung aufbereitete Höhenmodelle des Geländes (ohne Gebäude, Brücken, Vegetation, etc.) in unterschiedlichen Maßstäben. Die Zifferangabe der Bezeichnung steht für die Gitterweite der räumlichen Auflösung (z.B. DGM1 mit Gitterweite 1m)	DGM10 DGM25 DGM50 DGM200 DGM1000 <i>DGM1</i> <i>DGM2</i> <i>DGM5</i>
Digitale Topografische Karten (DTK)	DTK werden derzeit noch in vorläufiger Version als Farb-scan analoger Topografischer Karten oder bereits als Vektor- oder Pixelgrafik mit einer objektbezogenen Ebenengliederung in verschiedenen Maßstäben bereitgestellt. Die Zifferangabe der Bezeichnung steht für den Maßstab (z.B. DTK25 in Maßstab 1:25.000)	<i>DTK10</i> DTK25 DTK50 DTK100 DTK250 DTK1000
Digitale Orthophotos (DOP)	DOP sind photogrammetrische, d.h. durch Befliegung (Airborne Laserscanning) erzeugte, georeferenzierte und entzerrte Luftbilddaufnahmen. Die Zifferangabe der Bezeichnung steht für die Bodenauflösung in cm (z.B. DOP40 für 40cm Bodenauflösung).	DOP20 DOP40

2.5.4.2 Digitale Geländemodelle (DGM)

Ein Digitales Geländemodell (DGM; engl: *digital terrain model - DTM*) besteht aus diskreten, räumlich verteilten Höheninformationen (dreidimensionale Geländepunkte), die durch unterschiedliche Interpolationsalgorithmen zu Kurven und Flächen räumlich verbunden werden und so ein vereinfachtes, hinreichendes Abbild der realen Höhenstruktur eines Geländes darstellen (vgl. AdV 2004). Im Gegensatz zum Digitalen Oberflächenmodell (DOM, engl. *Digital surface model – DSM*), das Höheninformationen von Gebäuden, Bauwerken oder Vegetation (Nicht-Geländepunkte) beinhaltet, sind in einem DGM nur Höheninformationen des natürlichen Erdbodens (Gelände) enthalten. Optional kann ein DGM noch weitere Informationen und morphologische Strukturelemente umfassen. So werden Grundrissinformationen wie bspw. Böschungskanten oder Geripplinien (Rück- und Tallinien) zur näheren Strukturierung des Geländes eigens als „Digitales Situationsmodell“ als DGM-Bestandteil terminologisch geführt (Bill 2010). Diese Strukturen sind u.a. als Bruchkanten für eine realitätsnähere Geländemodellierung relevant.

Neben DGM und DOM findet auch der Begriff Digitales Höhenmodell (DHM; engl. auch: *digital elevation model – DEM*) Verwendung, häufig als Synonym für DGM oder DOM. Die Definition eines DHM ist jedoch nicht eindeutig, sondern abhängig von nationalen oder fachspezifischen Konventionen. Einerseits werden die Höheninformationen eines DGM als dessen wichtigstem Bestandteil gesondert als DHM bezeichnet (vgl. Bill 2010). Andererseits versteht man unter DHM auch aufgrund der fehlenden Spezifikation der Höheninformation einen allgemeiner Oberbegriff für Digitale Geländemodelle (DGM) und Oberflächenmodelle (DOM). Der internationale Sprachgebrauch offenbart eine noch größere Vielfalt in den Modellbezügen mit den Termini „*elevation*“, „*height*“, „*ground*“ und „*terrain*“, die beispielsweise von Li et al. (2005) erläutert und differenziert werden.

Für den vorliegenden Anwendungskontext reicht es aus, sich sprachlich auf die beiden Begriffe DGM und DOM nach Definition des AdV (2004) zu beschränken und bezüglich der Berücksichtigung von Bebauung (Gebäude, Brücken, etc.) und Vegetation bei der Senken- und Fließweganalyse zu differenzieren (siehe Abschnitt 4.2.1).

Die Datenerfassung für Digitale Geländemodelle erfolgt üblicherweise per Fernerkundung durch Befliegung als *Airborne Laserscanning* (ALS), auch bekannt unter der Bezeichnung *Light Detection and Ranging* (LiDAR). In Unterscheidung der beiden Messprinzipien „*pulsed laserscanning*“ oder „*continuous wave laserscanning*“ sendet der dabei eingesetzte Laserscanner gepulste oder kontinuierliche Messsignale im Mikrowellenbereich (Infrarot bei LiDAR) aus, die von Objekten der Erdoberfläche reflektiert werden. Aus der Laufzeitmessung zwischen Sendepuls und Reflektionsecho bzw. der Phasendifferenz sowie der Position des Sensors lassen sich Höhen- und Lageinformationen der Messpunkte ermitteln und so großräumige 3D-Punktwolken erzeugen. Die gepulste Lasermessung liefert vor allem bei Vegetationsflächen unterschiedliche Messprofile, von denen die spätere, letzte Reflektion (*last pulse*) als Bo-

denprofil die Geländehöhen liefert und zur DGM-Erstellung herangezogen wird (vgl. Bill 2010). Die Messgenauigkeiten von ALS-Systemen wie LiDAR variieren je nach Flughöhe und Beschaffenheit des Geländes. Sie liegen bei einer Flughöhe von ca. 1.000 m lagemäßig bei 0,05 m und höhenmäßig bei 0,1 m (Bill 2010). Die DGM-Produktstandards der AdV (AdV 2013) definieren ebenfalls ± 10 cm als Höhengenaugigkeit, jedoch mit prozentualen Zuschlägen je nach Geländecharakteristik und interpolierter DGM-Gitterweite (s. u.). Neben dem *Airborne Laserscanning* hat in den letzten Jahren sehr stark der vermessungstechnische Einsatz von Drohnen (sog. UAV-Technologie, *unmanned aerial vehicle*) für kleinräumigere Fragestellungen an Bedeutung gewonnen, gerade auch für Fragestellungen der Wasserwirtschaft und des Hochwasserschutzes (z. B. Brauneck et al. 2016). Neben den vielfältigen Anwendungsfeldern der Fernerkundung lassen sich mit UAV aufgrund der geringeren Flughöhen auch wesentlich höhere Punktdichten bei der DGM-Erfassung erzielen. Parallel dazu kommen auch terrestrische Verfahren des Laserscanning (z. B. mobile Laserscanner, Handscanner) zum Einsatz, die noch höhere Datengenauigkeiten ermöglichen, jedoch noch auf kleinräumigere Anwendungsfelder begrenzt sind.

Hinsichtlich der **DGM-Strukturierung** wird in unregelmäßigen und regelmäßigen Punktlagen unterschieden. Aus der Datenerfassung (ALS) liegt zunächst eine unregelmäßig räumlich verteilte 3D-Punktmenge vor, aus der z.B. über Triangulation (Dreiecksvermaschung) ein **unregelmäßiges Dreiecksnetz** (*triangulated irregular network - TIN*) erzeugt werden kann. Die Dreiecksflächen des TIN entstehen über die lineare Interpolation der Dreieckskanten. Da das TIN unmittelbar aus den Primärdaten aufgebaut wird, wird es auch als primäres DGM bezeichnet. Die Triangulation bietet den Vorteil, dass sich problemlos Bruchkanten als zusätzliche Dreiecksseiten in das DGM integrieren lassen.

Häufig werden die DGM-Rohdaten (3D-Punktwolke) oder das primäre DGM jedoch durch Interpolation in ein sekundäres DGM im **Rasterformat** mit regelmäßiger räumlicher Auflösung umgerechnet, wobei jeder Gitter- oder Rasterpunkt einen definierten Höhenwert enthält. Das Rasterformat führt zwar in Bereichen mit höheren Punktdichten zu Qualitätsverlusten gegenüber dem TIN, dafür bietet es durch die einfache Datenstruktur diverse Vorteile bei der Weiterverarbeitung (u. a. Speicherplatzbedarf, räumlich-statistische Auswertungen). Es hat sich mit festgelegten Auflösungen (Gitterweiten von 1 m bis 1.000 m) als DGM-Produktstandard der Bundesländer etabliert (siehe Tabelle 2-10) und begründet zudem die Begriffsdefinition gemäß AdV, die DGM als „digitale, numerische, auf ein regelmäßiges Gitter reduzierte Modelle der Geländehöhen und -formen der Erdoberfläche“ beschreibt (AdV 2013).

Zur Erzeugung eines kontinuierlichen Höhenrasters aus den punktförmig gemessenen Höheninformationen stehen unterschiedliche Interpolationsverfahren zur Verfügung. Allgemein werden dabei unbekannte Werte aus der räumlichen Nähe zu bekannten Werten, sog. Stützstellen, mathematisch abgeschätzt. Hierbei existiert eine große Vielfalt an Interpolationsverfahren, die methodisch in deterministische und geostatistische Verfahren unterschieden werden, wobei es auch kombinierte Verfah-

ren gibt. Details und Besonderheiten der unterschiedlichen Interpolationsverfahren sind u.a. in (Li und Heap 2008) beschrieben. Vorliegend werden korrespondierend zu den Untersuchungen in Abschnitt 5.2.1 die beiden für die Erstellung von Höhenmodellen gebräuchlichsten Interpolationsverfahren Natürlicher Nachbar (NaN) und Inverse-Distanzgewichtung (IDW) kurz erläutert.

Die räumliche Interpolationsmethode **Natürlicher Nachbar (NaN)** (*natural neighbor*) basiert auf einem Ansatz von Sibson (1981), bei dem der gesuchte Punktwert über eine begrenzte Anzahl benachbarter, bekannter Punktwerte (Stützstellen) flächenproportional gewichtet ermittelt wird. Die Festlegung der Stützstellengewichtung erfolgt über die Konstruktion eines Voronoi-Diagramms oder Thiessen-Polygons (näher beschrieben u.a. in Li et al. 2005). Die Vorteile dieses Interpolationsverfahrens liegen nach Li und Heap (2008) in der Erzeugung einer kontinuierlichen und geglätteten Oberfläche, die allerdings an den Stützstellen (Datenpunkten) abrupte Neigungswechsel aufweisen kann, was bedarfsweise eine gesonderte Glättung erforderlich macht. Auch sind im Bereich lokaler Extrema Interpolationsartefakte möglich (Sibson 1981).

Die **Inverse-Distanzgewichtung (IDW)** (*inverse distance weighting*) ähnelt der Interpolationsmethode Natürlicher Nachbar, weil auch hier die Interpolation über einen gewichteten Mittelwert aus einer begrenzten Anzahl bekannter Nachbarpunkte erfolgt. Die Gewichtung wird hier jedoch über die inversen Entfernungen des Zielpunkts zu den Nachbarpunkten festgelegt, sodass der Einfluss eines Nachbarpunkts auf das Interpolationsergebnis mit zunehmender Entfernung abnimmt. Der Gewichtungsansatz, der auf Shepard (1968) zurückgeht, ist im Detail in Abschnitt 5.2.1 beschrieben.

Das angewendete Interpolationsverfahren bestimmt zusammen mit der Auflösung der messtechnisch erfassten Stützstellen maßgeblich die Höhengenaugigkeit des resultierenden DGM. Daher wird in Abschnitt 5.2.1 die Anwendung der beiden Interpolationsansätze NaN und IDW zur Erstellung eines digitalen Oberflächenmodells des Siedlungsraums am konkreten Beispiel untersucht und bzgl. ihrer Ergebnisse miteinander verglichen und bewertet.

2.5.4.3 Digitale Orthophotos (DOP)

Digitale Orthophotos (DOP) sind photogrammetrische, d.h. durch Befliegung (*Airborne Laserscanning*, UAV) erzeugte, georeferenzierte und entzerrte Luftbildaufnahmen der Erdoberfläche. Die Erfassungsgenauigkeit der Befliegung bestimmt dabei auch die Datenqualität der DOP. Diese liegt standardmäßig bei einer Bodenauflösung von ca. 20 cm, was mit der Produktkennung DOP20 entsprechend gekennzeichnet wird. Für großräumigere (meso- und makroskalige) Fragestellungen kommen alternativ DOP40 mit entsprechend 40 cm Bodenauflösung zum Einsatz, die im Übrigen auch Datenbasis offener, webbasierter Kartendienste sind (z. B. „DOP Viewer“ des Bundesamts für Kartografie und Geodäsie, BKG 2017). Umgekehrt sind in einigen Bundesländern auch die höher aufgelösten DOP10 verfügbar (AdV 2016d).

DOP sind als Datengrundlage für Fragestellungen der Überflutungsprüfung und die Bearbeitung von Gefährdungs- und Risikoanalysen von großer Bedeutung. Sie vermitteln dem Bearbeitenden zunächst auf schnelle und einfache Art vielfältige Informationen zum Untersuchungsgebiet, unterstützen die Visualisierung und Plausibilisierung von Berechnungs- und Untersuchungsergebnissen, beispielsweise für generierte Fließwege und topografische Senkenlagen. Bei detaillierteren Berechnungsverfahren des Oberflächenabflusses können aus dem Luftbild zusätzliche, modellierungsrelevante Informationen gewonnen werden, z. B. zu Bruchkantenstrukturen (Bordsteine, Einfriedungen) oder im Liegenschaftskataster nicht erfasste Entwässerungsdetails, wie Straßeneinläufe, Rinnen, etc. (DWA 2016).

Gleichmaßen sind sie im Rahmen der Schadenspotenzialanalyse neben den ALKIS®-Daten eine wertvolle Datengrundlage zur Erstbewertung und Abschätzung von Schadenspotenzialen auf Grundlage dargestellter Bebauungs- und Gebäudedetails (relative Höhenverhältnisse, Untergeschosse, tiefliegende Zugänge und Zufahrten, Lichtschächte, etc.). Sie liefern ferner über visuelle Eindrücke zusätzliche Informationen zu Gebäude- und insbesondere Flächennutzungen sowie zu Vegetationsbeständen, die nicht in vergleichbarer Weise in den ALKIS®-Daten codiert sind.

Hinsichtlich der Qualitätsanforderungen für die Verwendung Digitaler Orthophotos im Zuge einer Überflutungsbetrachtung gilt der Grundsatz, dass die Aussagetiefe des DOP mit der Bodenauflösung deutlich zunimmt und entsprechend große Zoomstufen genutzt werden können. Insofern sollte auf DOP mit der größtmöglichen verfügbaren Bodenauflösung zurückgegriffen und mindestens mit DOP20 gearbeitet werden.

2.5.4.4 3D-Gebäudemodelle (LoD1-DE und LoD2-DE)

3D-Gebäudemodelle sind digitale, numerische Oberflächenmodelle, die nur die im ALKIS®-Objektkatalog definierten oberirdischen Objektbereiche „Gebäude“ und „Bauwerke“ umfassen. Sie stellen konkret eine Erweiterung der Datensätze der amtlichen Gebäudegrundrisse (Hausumringe) um die dritte (Höhen-)Dimension dar (AdV 2017c). Während die Lagegenauigkeit der 3D-Gebäudemodelle denen der Gebäudegrundrisse der amtlichen digitalen Liegenschaftskarte entspricht, existieren hinsichtlich der Höhengenaugkeit mit den beiden Modellausprägungen LoD1-DE und LoD2-DE zwei unterschiedliche Qualitätsstufen. „LoD“ steht für „*Level of Detail*“ und kennzeichnet die Abbildungsgüte der Dachgeometrien.

Die Modellausprägung LoD1 bildet keine Dachgeometrien ab und stellt die Gebäudegeometrie als „Klötzchen“ mit konstanten Flachdachebenen dar. Aufgrund dieser starken Vereinfachung liegt die angegebene Höhengenaugkeit auch nur bei größtenteils 5 m. Das 3D-Gebäudemodell LoD1-DE ist dafür jedoch bundesweit verfügbar (AdV 2016b, 2017c). In der Modellausprägung LoD2 sind die Dachgeometrien vereinfacht über standardisierte Dachformen (Satteldach, Pulldach, etc.) mit tatsächlicher Firstausrichtung berücksichtigt. Diese Abbildung ermöglicht wesentlich reali-

tätsnähere 3D-Visualisierungen von Siedlungsgebieten mit angegebenen Höhengenaugigkeiten von ca. 1 m. Das 3D-Gebäudemodell LoD2-DE ist aktuell in mehreren Bundesländern noch im Aufbau, soll jedoch zum Jahresbeginn 2019 ebenfalls bundesweit verfügbar sein (AdV 2016c, 2017c).

Für Fragestellungen der Gefährdungsanalyse ergeben sich in der Regel keine besonderen Anforderungen an die Höhengenaugigkeit oder den Detaillierungsgrad des Gebäudemodells (siehe Abschnitt 4.2.2.2)

2.5.5 Amtliche Liegenschaftskatasterinformationen (ALKIS®)

2.5.5.1 *Inhalt und Struktur*

Die Vermessungs- und Katasterverwaltungen führen das Liegenschaftskataster landesweit als öffentliches Register zum Nachweis, zur Darstellung und Beschreibung der Liegenschaften (Flurstücke und Gebäude). Das Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem ALKIS® wurde von der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) als objektorientiertes Datenmodell konzipiert und eingeführt. Es fasst die bisher getrennt verwalteten Katasterinformationen

- Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK),
- Automatisiertes Liegenschaftsbuch (ALB),
- Amtliche Hauskoordinaten Deutschland (HK-DE) und
- Amtliche Hausumringe Deutschland (HU-DE)

redundanzfrei zusammen (AdV 2017a). Von den vier genannten Komponenten werden aufgrund ihrer Relevanz für die vorliegenden Fragestellungen die Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) und das Automatisierte Liegenschaftsbuch (ALB) nachfolgend kurz erläutert.

Die digital geführte **Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK)** umfasst den darstellenden Teil des Liegenschaftskatasters. Dieser stellt i. W. die Flurstücke mit ihren Grenzen, den Gebäudebestand, die Nutzungsarten mit Grenzen sowie länderspezifisch topografische Gegenstände und Bodenschätzungen räumlich dar (AdV 2017a). Die digitale Liegenschaftskarte bildet damit zusammen mit den ATKIS®-Inhalten (s.o.) eine unverzichtbare Datengrundlage für die Analyse von Überflutungsgefährdungen und Risikoabschätzungen, weil sich mit ihr ermittelte Gefährdungs- und Risikobereiche mit den umliegenden Siedlungsrandbedingungen visuell verknüpfen lassen und so eine unmittelbaren Ersteinschätzung und Bewertung der lokalen Gefährdungs- und Risikolage möglich wird.

Das vor der ALKIS®-Einführung von den Bundesländern eigenständig digital geführte, **Automatisierte Liegenschaftsbuch (ALB)** bildet den beschreibenden Teil des Liegenschaftskatasters in ALKIS®. Es enthält Angaben zu Flurstücken (Flurstückkennzeichen, Fläche und Lagebezeichnung), deren Nutzungsarten, Eigentümer und

Rechteinhabern. Ferner enthält es Informationen zu Ergebnissen der Bodenschätzung, öffentlich-rechtliche Festlegungen zu den Grundflächen (Hinweise auf Baulasten, Naturschutzgebiete) und weitere flurstückbezogene Daten (AdV 2017a).

Mit der Zusammenführung der Liegenschaftsinformationen werden künftig der bislang erforderliche, hohe Synchronisationsaufwand zwischen den Einzeldatenbeständen sowie das Auftreten von Redundanzen und Inkonsistenzen vermieden. Dafür wurde von der AdV mit dem ALKIS®-Objektartenkatalog (ALKIS®-OK) ein länderübergreifender, bundeseinheitlicher Grunddatenbestand festgelegt, der von den Bundesländern verbindlich zu führen ist und bedarfsweise um weitere länderspezifische Inhalte im Objektartenkatalog ergänzt wird. Die Datenmigration auf ALKIS® ist seit Dezember 2015 in allen 16 Bundesländern abgeschlossen (AdV 2016a). Über eine einheitliche „Normbasierte Datenschnittstelle“ (NAS) lassen sich die ALKIS®-Datenbestände für GIS-Anwendungen bereitstellen.

Der Aufbau des Objektartenkatalogs (siehe Tabelle 2-11) folgt einer klaren Gliederung in fünf Hierarchieebenen, die in der GeoInfoDok umfassend zusammengestellt ist. Je nach Detaillierungsgrad der Informationen sind die Hierarchiestufen 3 bis 5 von vorrangiger Bedeutung. Über die eindeutige Kombination von Objektart, Attributart und Wertarten umfasst und beschreibt die GeoInfoDok auf mehr als 700 Seiten eine sehr große Anzahl an Objektwertarten (OWA), deren Informationsgehalt u. a. auch für Fragestellungen der Abschätzung und Bewertung von Schadenspotenzialen für Starkregenüberflutungen zu erschließen ist. Einzelheiten hierzu sind in Abschnitt 6.1 dokumentiert.

Tabelle 2-11: Hierarchieebenen des ALKIS®-Objektartenkatalogs mit Beispiel (AdV 2015c)

Hierarchieebene ALKIS®-OK	Beispiel
1 – Objektbereich	„Tatsächliche Nutzung“ (40000)
2 – Objektartengruppe	„Verkehr“ (42000)
3 – Objektart	„Weg“ (42006)
4 – Attributart	„Funktion“ (FKT)
5 – Wertart (Wert)	„Rad- und Fußweg“ (5250)

2.5.5.2 Amtliche Datengrundlagen für Nutzungsinformationen

Für Anwendungsfragen der Risikoanalyse für Starkregenüberflutungen sind vor allem die über das Liegenschaftsbuch verfügbaren Nutzungsinformationen sowohl zum Gebäudebestand als auch zur umgebenden Flurstücksfläche bedeutsam, da sich auf diese Informationen maßgeblich die Abschätzung und Bewertung des Schadenspotenzials stützt. Seit 1991 liegt mit dem AdV-Nutzungsartenkatalog (AdV 2015d) ein bundeseinheitliches Verzeichnis zum Nachweis der tatsächlichen Bodennutzung vor, das u. a. zur Erhebung der jährlichen amtlichen Flächenstatistik gemäß

Agrarstatistikgesetz (AgrStatG 2009) herangezogen wird (Schauer 2010; Ehrmanntraut und Nerkamp 2011; DESTATIS 2016). Er umfasst insgesamt 350 Einzelnutzungsarten, die als 5-stellige Codes strukturiert und hierarchisch zusammengefasst sind in insgesamt 26 Nutzungsartengruppen, die wiederum den vier Nutzungsartenbereichen Siedlung, Verkehr, Vegetation und Gewässer zugeordnet werden (siehe Tabelle 2-12). Wie beim ALKIS®-Objektartenkatalog ist auch hier von den Bundesländern nur ein Grunddatenbestand zu führen, der weitestgehend den 26 Nutzungsartengruppen entspricht.

Mit der Einführung von ALKIS® wurden die Inhalte des Nutzungsartenkatalogs in die ALKIS®-Objektarten des Bereichs „Tatsächliche Nutzung“ überführt. Die entsprechenden Zuordnungen sind im AdV-Nutzungsartenkatalog dokumentiert. Teilweise sind dabei Mehrfachzuweisungen möglich, da die ALKIS®-Objektarten nochmals Attributunterscheidungen ermöglichen (vgl. Tabelle 2-11). Darüber hinaus führt der ALKIS®-Objektartenkatalog über die Attribute GBF (Gebäudefunktion) und WGF (weitere Gebäudefunktion) detaillierte Nutzungsinformationen zum Gebäudebestand, auf die noch vertieft in Abschnitt 6.1.2 eingegangen wird.

Tabelle 2-12: Nutzungsartenbereiche und -gruppen des AdV-Nutzungsartenkatalogs (AdV 2015d)

10000 – Siedlung	20000 – Verkehr	30000 – Vegetation	40000 – Gewässer
11000 – Wohnbaufläche	21000 – Straßenverkehr	31000 – Landwirtschaft	41000 – Fließgewässer
12000 – Industrie- und Gewerbefläche	22000 – Weg	32000 – Wald	42000 – Hafenbecken
13000 – Halde	23000 – Platz	33000 – Gehölz	43000 – Stehendes Gewässer
14000 – Bergbaubetrieb	24000 – Bahnverkehr	34000 – Heide	44000 – Meer
15000 – Tagebau, Grube, Steinbruch	25000 – Flugverkehr	35000 – Moor	
16000 – Fläche gemischter Nutzung	26000 – Schiffsverkehr	36000 – Sumpf	
17000 – Fläche besonderer funktionaler Prägung		37000 – Unland, Vegetationslose Fläche	
18000 – Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche			
19000 – Friedhof			

2.5.6 Sonstige Datengrundlagen

2.5.6.1 *Biotopkartierungen der Länder*

Die Umweltministerien der Länder führen zur Erfassung der naturschutzfachlichen Gegebenheiten eigene Biotopkartierungen durch, die die vorhandenen Lebensräume eines Untersuchungsgebiets inventarisieren, insbesondere ausgewiesene Schutzgebiete dokumentieren. Die Biotopkartierungen basieren auf einer Zuweisung von Biotoptypen, die in einem Einstufungs- oder Bewertungskatalog abschließend definiert sind. Beispiele hierzu finden sich u. a. in Drachenfels (2016), Brandt und Engelschall (2011), Cordes und Conze (2013), Zimmermann et al. (2011), Köstler und Fietz (2005). Die Verwendungsmöglichkeiten dieser Informationsquelle für nutzungsbezogene Fragestellungen der Schadenspotenzialabschätzung sind jedoch länderspezifisch stark unterschiedlich und nicht überall gegeben, da sich die Biotopkartierungen in einigen Bundesländern aufgrund ihrer primären Intension vorrangig oder ausschließlich auf Außenbereiche von Siedlungen beziehen (z. B. Cordes und Conze 2013).

Einige Biotopkataloge enthalten jedoch auch anthropogen geprägte Biotoptypen oder „Stadtbiotoptypen“, die differenziertere Hinweise zu Gebäude- oder Flächennutzungen enthalten und bedarfsweise in eine Schadenspotenzialanalyse für Starkregenüberflutungen implementiert werden können (siehe Abschnitt 6.2.4.2)

2.5.6.2 *LAWA-Nutzungskatalog*

Mit Bezug auf die Bewertung von Hochwasserschäden hat die Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) einen eigenen Nutzungskatalog mit vierstelligen Schlüsselnummern erstellt. Dieser untergliedert die Ordnungsmerkmale der Nutzungen von Flächen und Gebäuden in acht Sektoren, die wiederum in Untersektoren, Kategorien und Unterkategorien eingeteilt sind (Niekamp und Piroth 2013). Da der LAWA-Nutzungskatalog nicht veröffentlicht ist und abgesehen von der Sektorebene die weitere Untergliederung nicht bekannt ist, kann die Eignung dieser Datengrundlage für den Anwendungsfall Schadenspotenzialbewertung nicht beurteilt werden.

2.5.6.3 *CORINE Land Cover (CLC)*

In dem 1985 initiierten EU-Vorhaben CORINE (*coordination of information on the environment*) wurden Daten der Satellitenfernerkundung zur standardisierten Erfassung von Änderungen in der Landbedeckung und –nutzung herangezogen. Die Unterscheidung der CORINE Land Cover (CLC) erfolgt seit der Ersterfassung 1990 in insgesamt 44 Landnutzungs- und Landbedeckungsklassen, wie z. B. Siedlungsflächen, Landwirtschaftsflächen, Wald, Gewässer, etc. Davon sind für Deutschland 37 Klassen erfassungsrelevant (Keil et al. 2011). Für die vorliegende Anwendung sind jedoch primär nur die bebauten Flächen des Siedlungsraums von Bedeutung, die in

11 Einzelklassen unterteilt sind. Die CLC-Datenomenklatur besteht aus einem dreistelligen Zahlencode. Die räumliche Auflösung der CLC-Flächenelemente hat sich von einer Mindest erfassungsgröße von 25 ha zwar auf 1 ha verbessert. Er bleibt jedoch hinter der Detaillierung des Digitalen Landschaftsmodells des Bundes (DLM-DE, siehe Tabelle 2-10) zurück (Niekamp und Piroth 2013) und bietet damit zur Differenzierung nutzungsbezogener Schadenspotenziale keinen Informationsmehrwert gegenüber der ATKIS®- bzw. ALKIS®-Datengrundlage.

2.5.6.4 Kommunale Meldedaten

Neben den Liegenschaftsdaten verwalten die Kommunen auch ihre Einwohnermelderegister, in denen mit gebäudescharfer Auflösung alle personenbezogenen Daten der Einwohner (Name, Alter, Geschlecht, Personenzahl je Haushalt, etc.) erfasst sind. Diese Informationen würden beispielsweise detailliertere Bewertungen von Schadenspotenzialen oder individuellen Resilienzen ermöglichen (siehe Abschnitt 6.2). Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird mit solchen Daten verständlicherweise sehr restriktiv umgegangen, sodass davon auszugehen ist, dass diese Datengrundlage für die vorliegenden Anwendungen in der Regel nicht oder nur in Ausnahmefällen anonymisiert verwertet werden können, beispielsweise wenn eine Kommunalverwaltung selbst Schadenspotenzialanalysen durchführen würde.

2.5.7 Datengrundlage der Ergebnisplausibilisierung

Neben den Datengrundlagen, die für die Durchführung einer Starkregen-Risikoanalyse erforderlich oder hilfreich sind, existieren welche, die gesondert für die Plausibilisierung der Ergebnisse herangezogen werden können.

- Einsatzprotokolle von Feuerwehren und Technischen Hilfsdiensten,
- Kommunale Dienst- und Betriebserfahrungen Entsorgungsbetrieb,
- Öffentliche Medienberichterstattungen (Presse, Rundfunk, TV)
- Berichte in sozialen Netzwerken / Social Media
- Objektbezogene Informationen (Auskünfte Betroffener, Versicherungsdaten)

Auf die zu Plausibilisierung der Ergebnisse verwendbare Datengrundlage wird gesondert in Abschnitt 7.3 eingegangen.

2.6 Zwischenfazit und Folgerungen

Die aufgezeigte Vielfalt und Heterogenität der risikorelevanten Begriffe (Abschnitt 2.1) verdeutlicht, dass eine inhaltliche und anwendungsbezogene Auseinandersetzung mit diesen Begriffen und deren Differenzierung für ein besseres Prozess- und Problemverständnis des Phänomens Starkregenüberflutung und urbane Sturzfluten zwingend erforderlich ist. Die Komplexität dieser Aufgabe resultiert aus den verschiedenen Sichtweisen und Definitionen zum Risikobegriff und seinen Komponenten. Angesichts der Anwendungs- und Bezugsvielfalt sind diese auch gerechtfertigt und sinnvoll. Sie erschweren jedoch die Festlegung für den konkreten Anwendungsfall, weil die Übertragbarkeit und Anwendbarkeit eingehend zu prüfen ist.

Das Themen- und Problemfeld von Hochwasser- und Starkregenereignissen ist zweifelsfrei in den Betrachtungskontext der Naturrisikoforschung einzuordnen und innerhalb dieses Definitionsfeldes zu bearbeiten und zu bewerten. In diesem Zusammenhang sind insbesondere auch die Risikosichtweisen zu den Folgen des Klimawandels relevant. Es sollten dennoch auch bewusst Denk- und Sichtweisen anderer Disziplinen (Soziologie, Ökonomie) miteinbezogen werden, auch wenn diese sich einer unmittelbaren methodischen Umsetzung entziehen. Beispielsweise lassen sich die Auswirkungen von und der Umgang mit Überflutungsschäden nur dann sachgerecht bewerten, wenn dies nicht allein auf materieller und technischer Ebene geschieht, sondern auch psychologische und gesellschaftliche Aspekte einfließen.

Es finden sich selbst in dem vergleichsweise eng eingegrenzten Themen- und Problemfeld der Risikobetrachtung von Hochwasser- und Starkregenereignissen im Detail verschiedene Annahmen und Vorstellungen zum Risikobegriff, die sich im Detaillierungsgrad und der Anzahl der Risikokomponenten unterscheiden. Ursächlich hierfür ist vor allem auch die räumliche und zeitliche Bezugsebene der Überflutungsbetrachtung, was sich vor allem am Vulnerabilitätsbegriff zeigt. Die Risikokomponenten sind in der Regel nicht oder nur ansatzweise adäquat über Parameter quantifizierbar, sodass unsichere Indikatoren als Ersatzgrößen benötigt und qualitativ bewertet werden. Dabei liegt ein Bewertungsschwerpunkt auf der makroskaligen, bestenfalls mesoskaligen Ebene.

Der für Deutschland maßgeblich in Merkblatt DWA-M 119 (DWA 2016) beschriebene Stand der Technik zur GIS-gestützten topografischen Gefährdungs- und Risikoanalyse belegt einen gewissen Pragmatismus beim methodischen Transfer der theoretischen Risikogrundlagen auf die Anwendungsebene. Die Reduktion des Risikobegriffs auf die beiden Komponenten Gefährdung und Schadenspotenzial, mit der sich Abschnitt 4.1 näher auseinandersetzt, stellt eine leicht umsetzbare Vereinfachung dar, die jedoch zwangsläufig auch einen Teil der vielschichtigen und komplexen Sachverhalte urbaner Starkregenüberflutungen und der damit einhergehenden Risiken nicht abbilden kann.

Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen dieser Arbeit die nachfolgenden Arbeitsschwerpunkte weiter verfolgt:

- **Definitionsrahmen des Risikobegriffs und seiner Komponenten**

Als Basis der vorliegenden Arbeit werden aufbauend auf den vorgenannten Erkenntnissen für die Methodik der topografischen Gefährdungs- und Risikoanalyse angemessene Konventionen und Festlegungen zur Beschreibung des Überflutungsrisikos und seiner Komponenten getroffen. Es wird dabei insbesondere vertieft analysiert, in welchem Umfang methodische Vereinfachungen bei der Implementierung der Vulnerabilität erforderlich sind, die bislang im Regelwerk noch nicht umfassend erörtert und analysiert wurden.

- **Ansätze zur methodischen Weiterentwicklung der topografischen Gefährdungs- und Risikoanalyse**

Es ergeben sich zu diversen Einzelschritten der in DWA-M 119 beschriebenen Methodik der Gefährdungsanalyse und vereinfachten Risikoabschätzung Detailfragen, die noch nicht hinreichend untersucht und beantwortet wurden. Darüber hinaus liegen bislang kaum Erkenntnisse darüber vor, ob es für einzelne Prozessschritte möglich ist, allgemein gültige Standardempfehlungen zu formulieren, beispielsweise bei der DGM-Aufbereitung und DOM-Erstellung oder der Identifikation von Gefährdungsbereichen und deren Klassifizierung.

Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt widmet sich der Entwicklung indikatorbasierter Ansätze zur Gefährdungsanalyse und Schadenspotenzialbewertung aufbauend auf der Analyse und Auswahl geeigneter Indikatoren zur Beschreibung der beiden Risikokomponenten. Es werden insbesondere Ansätze zur besseren Objektivierung der Schadenspotenzialbewertung untersucht. Aufgrund der stark eingeschränkten Quantifizierbarkeit des Schadenspotenzials (nur für tangible Schäden abschätzbar, bzw. nur individuell, d.h. am konkreten Einzelobjekt) existieren große Unsicherheiten und ein sehr hohes Maß an Subjektivität bei der Bewertung.

- **Verfügbarkeit, Anwendung und Ergebniseinfluss der Datengrundlagen**

In den in der Literatur beschriebenen Anwendungsbeispielen finden sich bislang nur vereinzelte Hinweise auf die Rolle und den Ergebniseinfluss der verwendeten Datengrundlagen. Es wird nur sehr allgemein und untergeordnet die Datengrundlage diskutiert und erörtert. Zudem fehlen konkrete Hinweise auf Anwendungsmöglichkeiten unterschiedlichster Daten. Mögliche Optimierungen durch den ergänzenden Einsatz weiterer Datengrundlagen wurden bislang nicht untersucht.

Es wird daher eingebunden in den methodischen Untersuchungen (Abschnitte 5 und 6) eine Übersicht zu den relevanten Daten gegeben und deren grundsätzliche Bedeutung für den Anwendungsfall der topografischen Gefährdungs- und Risikoanalyse für Starkregenüberflutungen, vorzugsweise bei der Beschreibung der Indikatoren bewertet.

3 Material und Methoden

3.1 Beschreibung der Untersuchungsgebiete

Für die vertiefende Untersuchung der einzelnen, methodischen Prozessschritte (topografische Gefährdungsanalyse, Schadenspotenzialanalyse und Risikobewertung, Abschnitte 5 bis 7) wurden drei urbane Untersuchungsgebiete in Saarbrücken, Hamburg und Neuwied ausgewählt. Diese unterscheiden sich bezüglich ihrer Ausdehnung, Topografie, Siedlungs- und Bbauungsstruktur, aber auch bezüglich der jeweils verfügbaren Datengrundlage (Übersichtskarten und Kurzbeschreibungen siehe Anhang A-1).

Die topografischen Gebietsparameter der drei Untersuchungsgebiete sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst. Es sind darin deutlich die unterschiedlichen Gebietscharakteristiken (Gebietsgrößen, Höhendifferenzen und Neigungsverhältnisse) erkennbar. Während das kleinste Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg) die geringsten Gefälle aufweist, liegen bei Saarbrücken und Neuwied ungefähr vergleichbare Neigungsverhältnisse vor, da beide Gebiete sowohl ausgeprägte Mittelgebirgshanglagen aufweisen als auch in Flusstälern liegen. Dabei sind in Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied) die absoluten Höhendifferenzen aufgrund der größeren Ausdehnung ausgeprägter als in Saarbrücken. Nähere Analysen der Gebietseigenschaften, wie die Höhen- und Neigungsverteilungen, wurden im Rahmen der Topografieanalyse vorgenommen und in Abschnitt 5.2 dokumentiert.

Tabelle 3-1: Zusammenfassung der Gebietsparameter, Untersuchungsgebiet 1 bis 3

<i>Parameter</i>	<i>Saarbrücken</i>	<i>Hamburg</i>	<i>Neuwied</i>
<i>Gebietsgröße [km²]</i>	30,00	17,45	86,46
<i>Geod. Höhendimension: min. – max. Höhen [m+NN]</i>	182,27 – 362,38	-0,26 – 46,97	53,13 - 369,81
<i>Max. Höhendifferenz [m]</i>	180,11	47,23	316,68
<i>Geländeneigung [Grad]: Mittelwert / Median</i>	15,4 / 10,0	7,0 / 4,2	15,5 / 7,7

Das **Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)** wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens UVoSaar (Schmitt und Scheid 2014) bearbeitet, bei dem verschiedene Arbeitsschritte der vorliegenden Methodik angewendet und erprobt wurden. Das Untersuchungsgebiet bietet für die vorliegende Fragestellung der topografischen Gefähr-

dungs- und Risikoanalyse den Vorteil, dass aus vergangenen Starkniederschlagsereignissen bereits mehrere Überflutungsschwerpunkte bekannt und zugehörige Einsatzmeldungen der Feuerwehr verfügbar sind, was für die Plausibilisierung der Ergebnisse eine hohe Bedeutung hat.

Das **Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)** dient aufgrund seiner deutlich abweichenden Charakteristik primär als Vergleichsgebiet zu den Untersuchungsgebieten 1 und 3. Insbesondere ist hier die vergleichsweise flache Topografie von besonderer Anwendungsrelevanz, beispielsweise für die Auswirkungen der DGM-Vorglättung. Das Untersuchungsgebiet 2 war als Pilotgebiet „Schleemer Bach“ Gegenstand einer topografischen Risikoanalyse innerhalb des Forschungsvorhabens „RISA - RegenInfraStrukturAnpassung Hamburg“ (RISA 2015).

Das **Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)** ist aufgrund der topografischen Ähnlichkeit zu Untersuchungsgebiet 1 für die Untersuchungen zur Gefährdungsanalyse nur von nachrangiger Bedeutung, weshalb die vorliegend beschriebenen Arbeitsschritte nicht in vollem Umfang auch für Neuwied durchgeführt wurden. Für das Untersuchungsgebiet Neuwied kann jedoch im Gegensatz zu den beiden anderen Gebieten auf voll verwertbare Katasterinformationen des ALKIS® (entsprechend den landesspezifischen Erfassungs- und Migrationsstandards von Rheinland-Pfalz) zugegriffen werden. Es bildet damit die wichtige Arbeitsgrundlage zur Bewertung der Schadenspotenziale (Abschnitt 6).

3.2 Datenverarbeitung und Werkzeuge

Für die vorliegend beschriebenen Untersuchungen zur Starkregen-Risikoanalyse wurde als GIS-Werkzeug die Anwendung ESRI ArcGIS 10.1 benutzt. Für die Prozessschritte der topografischen Gefährdungsanalyse (Senken- und Fließwegermittlung) wurden ergänzend zu der in ArcGIS implementierten Erweiterung „Spatial Analyst“ die Erweiterung Arc Hydro Version 2.0 (ESRI 2011) eingesetzt, die zusätzliche hydrologische Operationen ermöglicht. Die ergänzenden Untersuchungen zur Fließwegakkumulation per D_{∞} -Algorithmus (Abschnitt 5.4.1) wurden mit dem frei verfügbaren Werkzeugpaket TauDEM 5.3 (Tarboton 2015) durchgeführt.

Da der klare Fokus der vorliegenden Arbeit auf die methodischen und datenbezogenen Aspekte gerichtet ist und weniger auf produkt- und werkzeugspezifische Besonderheiten und Optionen eingegangen wird, wurde auf vergleichende Untersuchungen mit anderen GIS-Werkzeugen (vgl. Tabelle 2-9, S. 57) verzichtet. Sofern nicht anders angegeben, sind die beschriebenen Operationen und Werkzeuge nicht anwendungsspezifisch, sondern in vergleichbarer Form auch in anderen GIS verfügbar.

4 Gesamtkonzept der Starkregen-Risikoanalyse

4.1 Festlegungen und Konventionen

Für die weitere Vorgehensweise der Gefährdungs- und Risikoanalyse werden aufbauend auf den dargelegten Grundlagen (Abschnitt 2) die nachfolgenden Festlegungen und Konventionen zum Risikobegriff und dessen Komponenten getroffen.

- Ein Überflutungsrisiko entsteht dann, wenn sich ein Niederschlagsabflussergebnis als gefahrauslösender Prozess und die Vulnerabilität eines Risikoobjekts durch Exposition zeitlich-räumlich überlagern.
- Risiko besteht damit aus den drei Komponenten Gefahr, Exposition und Vulnerabilität des Risikoobjekts, entsprechend den Definitionen der „Risikodenkenschule 2“ (siehe Abschnitt 2.1.4.1).
- Von den drei Komponenten ist jedoch nur die Gefahr eine unabhängige, d. h. von den beiden anderen unbeeinflusste Risikokomponente. Sie wird maßgeblich beschrieben durch die vier Ereignisparameter Eintrittshäufigkeit, räumliche Ausprägung, Stärke und Dauer.
- Die Vulnerabilität ist gefahrenspezifisch definiert und steht in einem funktionalen Zusammenhang $V = f(G)$. Sie wird nach Lenz (2009) als immanente Größe angesehen, unabhängig davon, ob eine Exposition vorliegt. Daraus folgt die Verarbeitung der Exposition als eigenständige Risikokomponente (vgl. Crichton 1999). Die objektspezifische Vulnerabilität für Überflutungsschäden wird über die Komponenten Anfälligkeit (mangelnde Robustheit und Pufferkapazität) und das Schadenspotenzial als auf einen Referenzlastfall bezogener, oberer Grenzwert möglicher, tangibler und intangibler Überflutungsschäden ausgedrückt.
- Die Konvention, dass sich die Risikobewertung auf den Eintritt und das Ausmaß eines Schadensereignisses beschränkt, führt zu einer eng gefassten Vulnerabilitätsdefinition ohne Implementierung der Bewältigungskapazität, die erst nach Schadenseintritt wirksam wird („interne Vulnerabilität“).
- Die Exposition definiert sich als Bindeglied zwischen Gefahr und Vulnerabilität vollständig als räumlich-zeitliche Überlagerung dieser beiden Komponenten. Damit eine Exposition auftritt, müssen zwingend sowohl die Gefahr als auch ein vulnerables Risikoobjekt vorhanden sein. Vereinfacht gelten die Grundsätze „keine Exposition ohne Gefahr“ und „keine Exposition ohne vulnerables Risikoobjekt“.

- Die Überflutungsgefährdung bezeichnet im Sinne der Definition nach DWA-M 119 eine durch die Eintrittshäufigkeit und Ausmaßbeschreibung näher bestimmte Überflutungsgefahr mit potenzieller Schadenswirkung auf exponierte Risikoobjekte und ist somit eine abgeleitete Größe aus Gefahr und Exposition.
- Die Risikobewertung wird als Informations-, Diskussions- und Arbeitsgrundlage, somit als Einstieg in ein kommunales Risikomanagement zur Entwicklung und Realisierung unterschiedlichster Anpassungs- und Vorsorgemaßnahmen angesehen. Sie bezieht und beschränkt sich auf die Beschreibung der wesentlichen Umstände und Randbedingungen, die für das Eintreten und Ausmaß eines Schadensereignisses verantwortlich sind. Vor diesem Hintergrund werden weitere Aspekte der Resilienz und vorhandener Anpassungs- und Bewältigungskapazitäten nicht methodisch einbezogen, zumal es an zuverlässigen Indikatoren und Kennwerten hierfür mangelt.

Diese Festlegungen führen zu dem in Abbildung 4-1 dargestellten Schema der methodischen Umsetzung des Risikobegriffs, das im Rahmen dieser Arbeit gelten soll. Dieses ist eng angelehnt an die Darstellung nach DKKV (2003), modifiziert diese jedoch bzgl. der abweichenden Auffassung der Exposition im Sinne des Risikodreiecks nach Crichton (1999) (vgl. Abbildung 2-4, Seite 31).

Darauf aufbauend sind sowohl für die Gefährdungsanalyse als auch für die Vulnerabilitätsanalyse methodische Festlegungen zu treffen und hinsichtlich einer Anwendung Konkretisierungen erforderlich. Diese sind in den nachfolgenden Abschnitten 4.2 und 4.3 im Detail beschrieben.

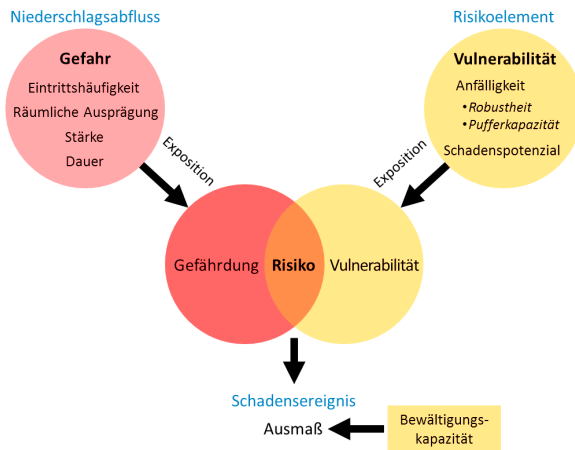


Abbildung 4-1: Methodische Umsetzung des Risikobegriffs für den Anwendungskontext Starkregenüberflutung (eigene Darstellung)

4.2 Methodik der topografischen Gefährdungsanalyse

4.2.1 Gefahren- bzw. Gefährdungsindikatoren für Starkregenüberflutungen

Die in Merkblatt DWA-M 119 (DWA 2016) formulierten Definitionen von Überflutungsgefahr und Überflutungsgefährdung (siehe Abschnitt 2.1.1) sollen im Kontext dieser Arbeit ebenfalls gelten. Die Überflutungsgefahr als das Auftreten und Ausmaß einer möglichen Überflutung infolge eines Starkregenereignisses ist vorrangig als prozessbezogene Risikokomponente anzusehen. Demgegenüber bezieht sich die Überflutungsgefährdung mit zusätzlicher Lokalisierung der Überflutungsgefahr und Bewertung einer Objektbetroffenheit auf das Prozessergebnis, konkret die potenzielle Schadenswirkung. Wie in Abschnitt 2.3.1 dargelegt, sind Gefahr und Gefährdung durch ihren Bezug auf das räumlich-zeitliche Überflutungsausmaß grundsätzlich belastungsabhängige Größen. Die topografische Gefährdungsanalyse kann die lastfallabhängigen Parameter des Überflutungsausmaßes nicht adäquat abbilden. Sie muss diese möglichst zutreffend durch geeignete Indikatoren ersetzen. Gut geeignete Indikatoren sind durch folgende Charakteristika und Eigenschaften gekennzeichnet (Hauger et al. 2006):

- hoher Informationsgehalt bei geringer Informationsunsicherheit
- geringer bzw. angemessener Erhebungsaufwand
- möglichst gute Quantifizierbarkeit und logische bzw. objektive Bewertbarkeit
- direkter Problembezug (hier zur Gefährdung), damit gut kommunizier- und nachvollziehbar

Tabelle 4-1 führt die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten **Gefahrenindikatoren** auf. Diese lassen sich über verschiedene Daten- und Informationspools beschreiben und anschließend fallspezifisch klassifizieren, da sowohl die Datengüte (Verfügbarkeit und Datenqualität) als auch die Bedeutung bzw. Ergebnisrelevanz der einzelnen Indikatoren gebietsabhängig sind. Entsprechende Detailbetrachtungen zur methodischen Verarbeitung einzelner Indikatoren sind in Abschnitt 5.1 dokumentiert.

Die in Abbildung 4-2 dargestellte Systematik stellt eine Weiterentwicklung der von Scheid et al. (2014) beschriebenen Methodik dar. Sie verdeutlicht die Weiterverarbeitung der Gefahrenindikatoren zur Ausweisung räumlicher Gefahrenzonen im Bereich der Senken und Fließwege (ggf. ergänzt um die Gefahrenzone Gewässer), die als Gefahrenkarte visualisiert werden.

Aufgrund des fehlenden Bezugslastfalls (Starkregenereignis der Häufigkeit n) bildet die topografische Gefährdungsanalyse eine Worst-Case-Situation des Überflutungsausmaßes ab, das sich im Zuge der Gefahrenklassifizierungen durch Abstufungen differenzieren lässt (siehe Abschnitte 5.3 und 5.4). Je nach den individuellen Randbedingungen des Untersuchungsgebietes können sich signifikante, zusätzliche Gefahrenbeiträge aus der Überlastung der Kanalisation oder dem Ausuferern urbaner Fließ-

gewässer einstellen. Insofern kann es bei entsprechend verfügbarer Datengrundlage im Einzelfall sinnvoll sein, optional die Parameter Kanalnetzüberstau oder Überschwemmungslinien für kleinere Hochwasser (bspw. HQ5 oder HQ10) in die Gefährdungsbetrachtungen einzubeziehen.

Tabelle 4-1: Parameter und Indikatoren zur Beschreibung der Gefahrenkomponenten

Gefahrenkomponente	Parameter	Indikator bei der Topografischen Analyse
Eintrittshäufigkeit	Wiederkehrzeit T_n [a] bzw. Wiederkehrhäufigkeit n [a ⁻¹] des Niederschlagsereignisses	Retentionshöhe h_{Ret} der Senken
Räumliche Ausprägung	Überflutungsflächen A_F [m ²] (Senken + Fließwege)	Max. Senkenausdehnung $A_{S,max}$ Fließwegzonen
	Kanalnetzüberstau [x]	Überstaustatistik Kanalisation
	Hochwasser	Überschwemmungslinien
	Auferung urbaner Fließgewässer	Hydraulische Engstellen
Dauer	Niederschlagsdauer D [min]	Max. Senkenvolumen $V_{S,max}$
Stärke	Niederschlagsabflusshöhe h_{NA} [mm] bzw. Überflutungsvolumen/ -tiefe	„Senkengröße“ als Kombination von $V_{S,max}$ und h_{max}
	Abflussakkumulation	Gefällesituation Senken-EZG
	Fließgeschwindigkeiten	Gefällesituation der Fließwege
Mitgeführte Feststoffe	Geschiebe-, Grobstoff-, Sediment- und Treibgutfrachten	Gefällesituation in Außengebieten als Senken-EZG, Landnutzung, Oberflächen- und Bodeneigenschaften

(grau hinterlegt: Optionale Parameter / Indikatoren)

Der Gesamtworkflow der indikatorbasierten topografischen Gefährdungsanalyse, wie sie Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist, ist in Abbildung 4-3 veranschaulicht. Dieser besteht aus einem Kernbereich an Arbeitsschritten, der allgemeingültig und obligatorisch auszuführen ist und gleichzeitig maßgeblich die Ergebnisse der topografischen Gefährdungsanalyse bestimmt. Er lässt sich grob in die drei Prozessphasen Vorarbeiten, Gefährdungsidentifikation und Gefährdungsbewertung untergliedern (jeweils grau hinterlegt dargestellt). Aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen in den Untersuchungsgebieten, die sich aus den konkreten Zielsetzungen und den verfügbaren Datengrundlagen ergeben, sind fallspezifische Modifikationen und Erweiterungen des Workflows möglich und erforderlich.

Die Teilprozesse des Workflows sind nachfolgend kurz erläutert. Ergänzend dokumentiert Abschnitt 4 vertiefende Untersuchungen zu den Arbeitsschritten, die besonders ergebnisrelevant sind oder sehr stark von der Datengrundlage beeinflusst werden.

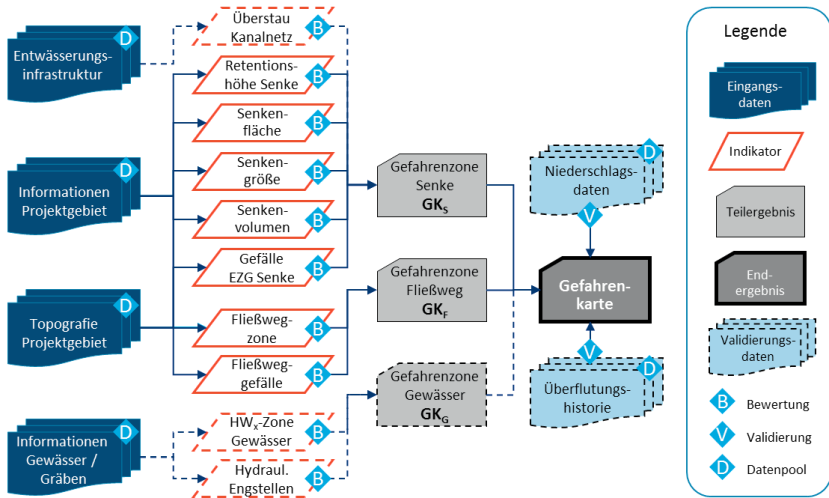


Abbildung 4-2: Systematik der indikatorbasierten topografischen Gefährdungsanalyse (verändert nach Scheid et al. 2014)

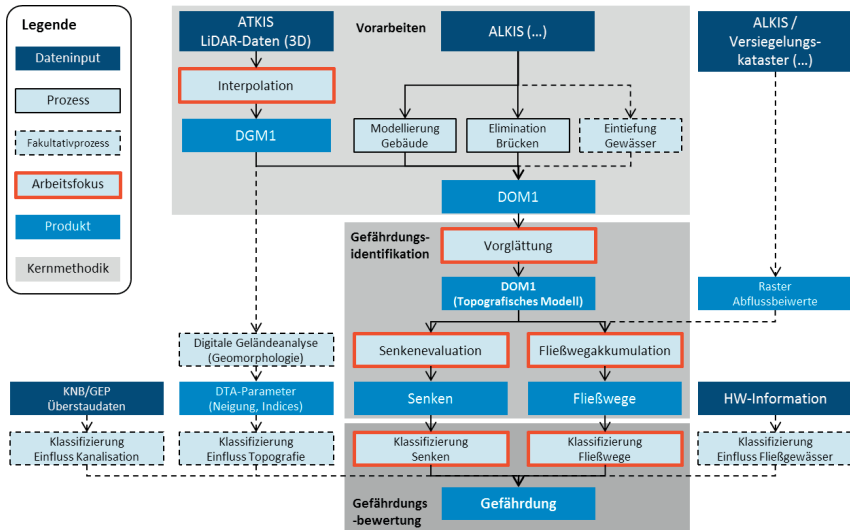


Abbildung 4-3: Workflow der topografischen Gefährdungsanalyse (eigene Darstellung). DGM1 = Digitales Geländemodell (1 m-Auflösung); DOM1 = Digitales Oberflächenmodell (1 m-Auflösung); DTA = Digital Terrain Analysis; KNB = Kanalnetzberechnung; GEP = Generalentwässerungsplan

4.2.2 Erstellung des Digitalen Oberflächenmodells (DOM)

Ein auf die Fragestellung angepasstes (vereinfachtes) und dennoch möglichst realitätsnahes Digitales Oberflächenmodell (DOM) bildet die fundamentale Datengrundlage aller Prozessschritte der Gefährdungsanalyse und bestimmt unmittelbar die Qualität der Prozessergebnisse. Je nachdem, welche topografische Datengrundlage des Untersuchungsgebiets vorhanden ist, sind unterschiedlich detaillierte Aufbereitungsschritte der verfügbaren Geodaten (z. B. DGM-Rohdaten aus Laserscanning) zum Digitalen Oberflächenmodell (DOM) erforderlich. Die Vorgehensweise bei der Erzeugung des DOM wird nachfolgend anhand der wichtigsten, ergebnissensitiven Prozessschritte methodisch beschrieben. Darauf aufbauend werden einzelne Detailfragen hierzu in Abschnitt 4 anwendungsbezogen näher untersucht und analysiert.

4.2.2.1 DGM-Interpolation

Die per Laserscanning (LiDAR) gewonnenen DGM-Rohdaten weisen aufgrund der planmäßigen Elimination aller Nicht-Geländepunkte größere Lücken auf, die vor der Implementierung des oberirdischen Gebäudebestandes durch räumliche Interpolation zu schließen sind. Dazu können diverse Interpolationsverfahren verwendet werden, deren Auswirkungen auf das endgültige Oberflächenmodell und damit die topografische Senken- und Fließweganalyse nicht geklärt sind. Abschnitt 5.2.1 widmet sich dieser Fragestellung und analysiert am Fallbeispiel das Ausmaß der DGM- bzw. DOM-Höhendifferenzen aufgrund unterschiedlicher Interpolationsansätze.

4.2.2.2 Implementierung des Gebäudebestands

Mit der Implementierung des oberirdischen Gebäudebestandes in das lückenlose DGM wird der wichtigste Schritt zur Erzeugung des DOM vollzogen und die bedeutendste Datengrundlage der topografischen Gefährdungs- und Risikoanalyse geschaffen. Die urbane Gebäudestruktur wird bei einem DOM auf Rasterbasis über ein Klötzchenmodell abgebildet, das dabei gleichermaßen als Verteilung von Abflusshindernissen und potenziellen Schadensobjekten fungiert. Hierzu kann optional auf die flächendeckend verfügbaren, amtlichen 3D-Gebäudemodelle LoD1-DE (siehe Abschnitt 2.5.4.4) zurückgegriffen werden. Alternativ kann jedoch auch ein gesondertes Gebäudemodell vereinfacht erstellt werden, indem die vektorbasierten Umringe des oberirdischen Gebäudebestands gemäß Liegenschaftskarten (ALK) in ein Raster überführt werden, mit dem dann das DGM auf einen gebäudeweise konstanten Höhenwert, beispielsweise entsprechend einer Geschosshöhe, erhöht wird. 3D-Gebäudemodelle mit Darstellung realitätsnäherer Höhen und Dachformen (LoD2-DE) bieten für rasterbasierte Untersuchungen, wie der topografischen Gefährdungsanalyse, keine methodischen Vorteile und sind bestenfalls eine Option zur verbesserten Visualisierung. Sie lassen sich aufgrund der Vektordatenbasis leichter in TIN-basierte Modellierungen, z. B. bei der 2D- bzw. 1D/2D-Abflusssimulation implementieren.

4.2.2.3 Implementierung der Oberflächengewässer

Die Oberflächengewässer, insbesondere die urbanen Fließgewässer (Bach- und Flussläufe, Kanäle etc.) eines Untersuchungsgebiets sind für die Fragestellungen der Starkregengefährdungsanalyse von besonderer Bedeutung. Als (natürlich) gegebene Geländetiefen und Flutachsen stellen sie durch ihr rasches Anschwellen und Ausufern prädestinierte Gefährdungszonen für Starkregenüberflutungen und urbane Sturzfluten dar, wie sich bei solchen Ereignissen regelmäßig eindrucksvoll zeigt. Insofern ist auch zu entscheiden, ob und in welcher Form urbane Gewässerbereiche als gesonderte Randbedingungen bei der topografischen Gefährdungsanalyse zu verarbeiten sind.

Die Rohdaten des DGM bilden Wasserläufe und -flächen i.d.R. zwar bereits über die Höhenwerte als lokale Tiefen und Senken ab, allerdings können diese entsprechend der Messgenauigkeit der DGM-Datengrundlage streuen, was insbesondere bei ausgedehnten Wasserflächen die Kartendarstellung beeinträchtigen kann. Es kann daher im Hinblick auf die Fließweggenerierung erforderlich und sinnvoll sein, Fließgewässer, aber auch stehende Gewässer (Seen, Teiche, Rückhaltebecken mit Dauerstau, etc.) virtuell um ein geringes Maß einzutiefen, um damit klare Fließwegverläufe entlang der Fließgewässer und in den Gewässerrandbereichen zu erhalten. Bei entsprechender Verfügbarkeit lassen sich anhand von Vermessungsdaten (z. B. Längsprofile) die Verläufe urbaner Gewässer mit realen Sohlhöhen und Fließgefällen entsprechend der DGM-Auflösung abbilden.

Je nach Gebietstopografie kann es jedoch auch zielführend sein, vor allem ausgedehnte Wasserflächen, wie Seen oder Flussläufe, für die bei einem Starkregenereignis ein höhenmäßiges Anschwellen oder Ausufern unwahrscheinlich ist, aus dem DOM zu eliminieren. Durch die damit erzeugten Datenlücken wird der Gewässerbereich weder als Fließweg noch als Senke abgebildet und die generierten Fließwege enden an den Gewässerrändern, was Vorteile für die Darstellung und Senkenauswertung bietet (vgl. u. a. Scheid et al. 2014; RISA 2014).

4.2.2.4 Berücksichtigung von Brücken und Gewässereinbauten

Der Bestand an Brücken- und Tunnelbauwerken, wie z. B. Unterführungen, ist maßgeblich für die Komplexität der urbanen Topografie verantwortlich und insbesondere für die korrekte Abbildung oberflächiger Fließweg- und Senkenstrukturen relevant. Wie auch bei Gebäuden sind die Höheninformationen solcher Strukturen kategorisch aus den Laserscanning-Daten (LiDAR) als Nicht-Geländepunkte eliminiert. Die dort vorhandenen Lücken des DGM sind durch geeignete Verfahren zu schließen (siehe Abschnitt 4.2.2.1), wobei die Geländehöhen unterhalb des Brückenquerschnitts als die für die Fließwegbildung maßgeblichen Geländepunkte möglichst zutreffend zu rekonstruieren sind. Die standardmäßige Anwendung von Interpolationsverfahren führt je nach Brückenquerschnitt und Ausprägung der DGM-Lücke

regelmäßig zu ungeeigneten Ergebnissen, weshalb alternative Vorgehensweisen erforderlich sind. Diese werden in Abschnitt 5.2.1 näher behandelt.

Daneben bedarf es einer differenzierten Bewertung von Brücken und Durchlässen hinsichtlich ihrer hydraulischen Wirkung auf die bei Starkregen auftretenden Oberflächenabflüsse. Insbesondere weil die Methode der topografischen Gefährdungsanalyse keine Abflusssimulation vorsieht, sind die zu erwartenden Abflussverhältnisse im Bereich von Brückenquerschnitten und Durchlässen sorgfältig zu beurteilen.

So kann es bei kleinen Brücken und Stegen mit entsprechend geringen Fließquerschnitten hinsichtlich der Ermittlung gefährdungsträchtiger Senkenbereiche sachgerecht sein, auf eine Elimination dieser Engstellen im DOM bewusst zu verzichten, um die potenzielle Verklauungsgefahr oberhalb solcher Bauwerke abzubilden. Dies gilt umso mehr für verlegungsanfällige Rohrdurchlässe in Dammkörpern etc., die ein DGM standardmäßig nicht abbildet und die auch nicht in das DOM eingearbeitet werden sollten.

4.2.3 DOM-Vorglättung und Senkenevaluation

Auf Grundlage des generierten Digitalen Oberflächenmodells (DOM) wird GIS-gestützt die kombinierte Generierung von Fließwegen und Senken durchgeführt. Es enthält jedoch in der Regel eine sehr große Anzahl an kleinsten topografischen Eintiefungen und Senken, die mit nur wenigen Zentimetern Tiefe unterhalb der Höhen Genauigkeitsschwelle des DOM liegen und die u. a. als Fließwegenden bei den weiteren Prozessschritten die Auswertung erschweren. Daher ist es empfehlenswert, der Senkenevaluation (auch: Senkenselektion), bei der die Relevanz der Senken bezüglich einer Überflutungsgefahr festgelegt wird (Abschnitt 4.2.5.1), eine Vorglättung des DOM vorzuschalten. Bei diesem fakultativen Arbeitsschritt, auch „prescreening“ bezeichnet, wird GIS-gestützt die Gebietstopografie durch Auffüllung kleinster Mulden und Senken geglättet, klarer strukturiert und gleichzeitig eine überschaubarere Anzahl lokaler Senken für die weiteren Analysen erzeugt. Darüber hinaus wird eine höhere Konsistenz bei der Fließweggenerierung erreicht, weil für ein geglättetes DOM automatisch längere Fließwegabschnitte generiert werden. Es stehen GIS-Routinen zur Verfügung, die alternativ zur Mindesttiefe mit anderen Glättungskriterien (z. B. Einzugsgebietsgröße einer Senke) arbeiten.

Allerdings führt jede DOM-Glättung auch zu Abweichungen von den (tachymetrisch) erfassten topografischen Gegebenheiten, sodass Informationsverluste und Qualitätseinbußen des DOM möglich sind, die die Aussagegüte der Senken- und Fließweganalyse lokal verschlechtern können. Diese Einschränkung ist für Anwendungsfälle wie der topografischen Gefährdungsanalyse mit dem Anspruch, räumlich vergleichsweise hoch aufgelöste Bewertungsergebnisse zu erhalten, von besonderer Relevanz. Eine entsprechend kritische Prüfung ist beispielsweise über die Bilanzierung des Glättungsvolumens eines Untersuchungsgebiets gut möglich (siehe Ab-

schnitt 5.2.2). Es ist in diesem Kontext wichtig zu betonen, dass die zur Verfügung stehenden GIS-Routinen zur Geländeglättung als Analysewerkzeuge der Geomorphologie standardmäßig für die Erstellung und Aufbereitung hydrologischer Einzugsgebiete konzipiert wurden, um beispielsweise Flussgebietsmodelle bzw. Niederschlag-Abfluss-Modelle zu erstellen. In diesem Anwendungskontext ist bei lokalen Senken zu unterscheiden in topografische Artefakte aufgrund von Interpolations- oder Messfehlern (*spurious pits*) und in tatsächliche Senken (Lindsay und Creed 2006). Da natürliche Senken in geomorphologischer Betrachtung infolge stetiger Erosions- und Sedimentationsprozesse selten sind (Mark 1984), werden sie bewusst als „Störgrößen“ der Fließweggenerierung eliminiert (vgl. Hutchinson 1989; Wang und Liu 2006).

Insofern muss bei der Anwendung von Vorglättroutinen ein Kompromiss zwischen beabsichtigter DOM-Vereinfachung zwecks Senkenauswahl und den dabei in Kauf zu nehmenden Ungenauigkeiten gefunden werden. Die während dieses Prozesses hervorgerufenen Informationsverluste lassen sich in den nachfolgenden Arbeitsschritten nicht mehr kompensieren; einmal geglättete Senkenbereiche stehen für weitere Analysen der Überflutungsgefahr nicht mehr zur Verfügung.

Erste Untersuchungen zu den Auswirkungen unterschiedlicher Vorglättroutinen wurden im Rahmen des Forschungsprojekts UVoSaar (Schmitt und Scheid 2014) durchgeführt. In Abschnitt 5.2.2 sind die Ergebnisse einer weiterführenden, systematischen Analyse unterschiedlich starker Vorglättroutinen dokumentiert und darauf aufbauend Anwendungsempfehlungen zu diesem Prozessschritt formuliert.

4.2.4 Identifikation von Fließwegen und Flutachsen

Mit der Ermittlung oberirdischer Fließwege und Flutachsen wird neben den Senkenlagen die zweite wesentliche Gefährungskomponente identifiziert. GIS-gestützt ist dieser Teilprozess bereits obligatorisch in die Senkenermittlung integriert. Es werden dabei mehrere, aufeinander aufbauende GIS-Operationen durchgeführt, i. W. die rasterweise Berechnung von Gefällerrichtungen (*flow direction*) mit anschließender rasterbasierter Zusammenfassung entlang des Gefälles (*flow accumulation*). Als Resultate der Fließweggenerierung wird neben den Verläufen der Fließwege zu jedem betrachteten Rasterfeld des Fließwegs die Größe der angeschlossenen, d.h. dorthin entwässernden Einzugsgebietsfläche (*upslope contributing area*) berechnet. Ferner ist zu jedem Rasterfeld die maximale Fließweglänge als maximale Distanz zur Wasserscheide leicht ermittelbar.

Die Generierung von Gefällerrichtungen zur Beschreibung der Hangneigung³ eines Gebiets gehört zu den essenziellen Aufgabenstellungen in der topografischen Geländeanalyse. Sie findet darüber hinaus als Ermittlung oberirdischer Fließwege (*flow*

³ Der in der Geografie und Bodenkunde hierfür gebräuchliche Begriff der Exposition wird hier nicht verwendet, um die Mehrdeutigkeit zum Risikobegriff „Exposition“ zu vermeiden.

routing) eine breite und langjährige Anwendung bei geomorphologischen und hydrologischen Fragestellungen (vgl. Moore et al. 1991; Wilson und Gallant 2000a). Für die Berechnung der Gefällerrichtungen existieren zahlreiche, unterschiedliche methodische Ansätze und Berechnungsalgorithmen, zu denen vorliegend nur eine kurze Übersicht gegeben werden soll. Weitere Details und vergleichende Untersuchungen zu den unterschiedlichen Berechnungsalgorithmen sind u.a. in (Tarboton 1997; Erskine et al. 2006; Seibert und McGlynn 2007; Bartak 2009) beschrieben.

Grundsätzlich lassen sich die Algorithmen einerseits nach der Anzahl der möglichen Fließrichtungen und andererseits nach deren Eindeutigkeit kategorisieren (Tabelle 4-2). Bei eindirektionalen Verfahren (*single flow*) wird der Fließweg nur in die eine Richtung mit dem größten Gefälle generiert, woraus ein konvergentes Fließwegesbild resultiert. Bei multidirektionalen Verfahren (*multiple flow*) wird entsprechend dem Gefälle der Fließweg in mehrere oder alle tiefer liegenden Nachbarzellen fortgesetzt, sodass ein divergentes Fließwegesbild entsteht.

Tabelle 4-2: Kategorisierung von Algorithmen zur Fließrichtungsberechnung (eigene Darstellung nach Bartak 2010)

konvergent		divergent	
SFD8	SFD ∞	MFD8	MFD ∞
8 Fließrichtungen	infinite Fließrichtungen	8 Fließrichtungen	infinite Fließrichtungen
D8 (O'Callaghan und Mark 1984; Mark 1984) ρ8 (Fairfield und Leymarie 1991)	D ∞ (Tarboton 1997)	MFD8 (Quinn et al. 1991; Freeman 1991)	MD ∞ (Seibert und McGlynn 2007)

Der **SFD8-Ansatz** beinhaltet eine eindirektionale, konvergente Fließwegberechnung, die standardmäßig in den meisten GIS-Anwendungen verfügbar und entsprechend weit verbreitet ist. Entwickelt wurde dieser Ansatz als „Deterministic 8 Algorithm“ (D8) von Mark (1984) bzw. O'Callaghan und Mark (1984). Hierbei erfolgt die Fließrichtungsberechnung eines Rasterfelds ausschließlich in Richtung der einen von acht Nachbarzellen, die das größte Gefälle zum Betrachtungspunkt aufweist. SFD8 liefert zwar eine vollständige Fließwegkonvergenz, stellt damit jedoch eine grob vereinfachte Abbildung der tatsächlichen Fließwegausbildung dar, weil Abflussaufteilungen in mehrere Gefällerrichtungen nicht möglich sind. Zudem wird bei nur acht mög-

lichen Fließrichtungen die tatsächliche Richtung des Maximalgefälles nicht abgebildet. In ebenen und konstant geneigten Geländebereichen führt dies zu unnatürlich gerade und parallel verlaufenden Fließwegen (Erskine et al. 2006). Mit dem Rho8-Algorithmus ($\rho 8$, *random eight-node*) wird von Fairfield und Leymarie (1991) eine Modifikation des D8-Algorithmus zur Kompensation dieser Schwächen beschrieben.

Bei einem **SFD ∞ -Ansatz**, wie z. B. der Deterministic Infinite Algorithm ($D\infty$) von Tarboton (1997), wird die exakte Richtung des Gradienten durch eine umgekehrt proportionale Aufteilung der Fließrichtung auf die beiden Nachbarrasterfelder des Gradienten berücksichtigt. Da trotz dieser Fließrichtungsaufteilung ein weitgehend konvergentes Fließwegesbild erzeugt wird, ist $D\infty$ als Single Flow-Ansatz anzusehen (Bartak 2010).

Multidirektionale Berechnungsalgorithmen erlauben eine Fließwegeermittlung in mehrere Richtungen. Der **MFD8-Algorithmus** nach Quinn et al. (1991) teilt die Fließrichtung gefällegewichtet auf alle tiefer liegenden Nachbarzellen auf. Freeman (1991) modifiziert die Gefällegewichtung dieses Ansatzes durch die Verwendung eines Gewichtungsexponenten. Mit dem von Seibert und McGlynn (2007) beschriebenen Algorithmus **MD ∞ (MFD ∞ -Ansatz)** werden die Vorteile der beiden Algorithmen MFD8 und $D\infty$ zu einem multi flow-Ansatz kombiniert, der die tatsächlichen Richtungen mehrerer Gradienten berücksichtigt. Als weitere bekannte MFD-Ansätze sind der Kinematic Routing Algorithmus (KRA) nach Lea (1992) und DEMON nach Costa-Cabral und Burges (1994) zu nennen.

Für die Gefährdungsabschätzung starkregenbedingter Überflutungen ist zu klären, welcher Fließwegalgorithmus dafür am besten geeignet ist. Neben der erzielbaren Abbildungsgüte der Fließwege geht es dabei auch um eine einfache, stabile Anwendbarkeit und gute Verfügbarkeit des Algorithmus sowie EDV-bezogene Effizienzfragen (Speicherbedarf, Prozessorleistungen, siehe Arge et al. 2003).

Die mit eindirektionalen Ansätzen erzeugte Fließwegkonvergenz wird sowohl als fundamentaler Kritikpunkt (u. a. Seibert und McGlynn 2007) als auch als methodische Zielsetzung und Vorteil (Tarboton 1997) angesehen: Wenn auch bei einer rasterbasierten Anwendung die Fließrichtungen nur in 45°-Abstufungen darstellbar sind, kommen bei der Beschränkung des Fließgefälles auf nur eine von acht möglichen Richtungen diese Ungenauigkeiten voll zum Tragen. Der Richtungsfehler kann bis zu 22,5° betragen und gleichzeitig wird der anzunehmende Abflussbeitrag in diese Richtung methodisch überschätzt bei Unterschätzung bzw. Vernachlässigung weiterer möglicher Abflussrichtungen (vgl. Fairfield und Leymarie 1991; Quinn et al. 1991; Costa-Cabral und Burges 1994; Tarboton 1997). Umgekehrt liefert die Konvergenz eindeutige Fließwegenetze und hydrologische Einzugsgebiete, was für verschiedene hydrologische Fragestellungen bedeutsam ist.

Bei multidirektionalen Algorithmen, insbesondere bei MFD8, wird die klare Einzugsgebietsabgrenzung durch die Erzeugung sich mehrfach überlagernder und kreuzender Fließwege erschwert, was für die Ermittlung abgeleiteter Größen (Ab-

flüsse, Sedimentfrachten, etc.) von Nachteil ist (Seibert und McGlynn 2007). Demgegenüber liefern MFD-Ansätze aufgrund der divergenten Abflussdarstellung realistischere Fließwegdarstellungen, insbesondere bei divergenten Geländeformen, wie Hanglagen mit konvexen Querkrümmungen, Kuppen oder flachen Plateaus (vgl. Seibert und McGlynn 2007; Czickus 2014).

Der zur Gefährdungsanalyse angewendete Berechnungsalgorithmus sollte auf die Randbedingungen und die Charakteristik des Untersuchungsgebiets, aber auch auf die technischen Leistungsparameter der GIS-Anwendung angepasst sein. Insbesondere bei vergleichsweise flacher Topografie liefern divergente Berechnungsalgorithmen, die Aufteilungs- und Auffächerungseffekte berücksichtigen, bessere Resultate als konvergente Verfahren. Im Hinblick auf die Zielsetzung und Anforderungen einer ersten Gefährdungsabschätzung für starkregenbedingte Überflutungen kann davon ausgegangen werden, dass auch die standardmäßige Fließwegberechnung mit SFD-Ansätzen (D_8 und D_∞) ausreichende erste Informationen darüber liefern, aus welcher Richtung die jeweiligen Senken mit Oberflächenwasser gespeist werden und wo sich maßgebliche Abflusstrassen und Flutachsen ausbilden. Die bereits genannte Schwäche des D_8 bei der Richtungsgenerierung im Ebenen ist weniger relevant, da diese Bereiche als vorgefüllte Senken ohnehin als Gefährdungszonen markiert sind. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Fließwegermittlung beschränken daher auf die Anwendung des D_8 -Algorithmus mit einem exemplarischen Quervergleich zu D_∞ (Abschnitt 5.4).

Neben der Festlegung des Berechnungsansatzes der Fließwege sind Überlegungen zur Berücksichtigung unterschiedlicher Oberflächenabflusswirksamkeiten anzustellen. Die GIS-gestützte Gefährdungsanalyse als belastungsunabhängiges Verfahren verfolgt nicht den Anspruch, die bei einem Starkregenabfluss erfolgenden hydraulischen Prozesse ersatzweise und vereinfacht abzubilden. Dennoch kann es je nach Fragestellung sinnvoll und erforderlich sein, den unterschiedlichen Oberflächen des Untersuchungsgebiets über ein Wichtungsraster verschiedene Abminderungsfaktoren zuzuweisen, die als stark vereinfachte, pauschale Form eines Abflussbeiwertes interpretiert werden können (siehe Abbildung 4-4). Als Datengrundlage können hierfür je nach Datenverfügbarkeit die ALKIS[®]-Informationen zur Flächennutzung (siehe Abschnitt 2.5.5.2) oder auch vereinfachte Landnutzungsdaten (CORINE) (Abschnitt 2.5.6.3) herangezogen werden. Je nach Verfügbarkeit kann das Wichtungsraster auch aus Befestigungsgraden bzw. Flächenkennwerten eines bestehenden Oberflächenmodells einer Kanalnetzberechnung abgeleitet werden. In Einzelfällen kann es zur Beurteilung verschiedener Gefährdungsszenarien auch erforderlich sein, unterschiedliche Wichtungsraster zu verwenden.

Die Entscheidung darüber, ob und wie detailliert eine Abflussgewichtung erforderlich bzw. sinnvoll ist, sollte fallspezifisch getroffen werden und hängt u. a. von verschiedenen Aspekten ab:

- **Flächendiversität des Untersuchungsgebiets:** Dieser Aspekt zielt weniger auf die allgemein vorhandene Heterogenität der Flächenarten eines Siedlungsraums ab, sondern darauf, dass größere, zusammenhängende Bereiche mit hohen Anteilen unbefestigter Flächen (z. B. unbebaute Außengebiete, Wald-, Park- und Grünflächen) entsprechend weniger abflusswirksam gewichtet werden.
- **Zielsetzung der Gefährdungsbewertung und die damit fokussierte Starkregenbelastung:** Mit zunehmender Regenintensität steigt auch die Abflusswirksamkeit der nicht oder gering befestigten Oberflächen an, sodass die Relevanz einer Abflussgewichtung hinsichtlich der Gefährdungsbetrachtung extremerer Ereignisse abnimmt.
- **Gebietstopografie:** Bei Untersuchungsgebieten mit flacher Topografie sind die Unterschiede zwischen den Abflussbildungseigenschaften nicht befestigter Oberflächen und denen befestigter Oberflächen stärker ausgeprägt, was durch eine Abflussgewichtung berücksichtigt werden kann.



Geodatengrundlage: © LHS/LVGL

Abbildung 4-4: Beispiel eines Wichtungsrasters (Abflussbeiwerte) für die Fließwegakkumulation (eigene Darstellung)

4.2.5 Bewertung der Überflutungsgefährdung

Die für ein Untersuchungsgebiet generierten Senken und Fließwege als Gefahrenbereiche für Starkregenüberflutungen weisen in der Regel eine sehr breite Wertestreuung auf. Daraus ergibt sich ein entsprechendes Erfordernis zur differenzierten Bewertung der Überflutungsgefährdung, indem Senken und Fließwege anhand spezifischer Kriterien und Parameter hinsichtlich ihrer Überflutungsgefahr klassifiziert werden. Dies gilt insbesondere für die topografische Gefährdungsanalyse als belastungsunabhängige Methode: Die gewählten Gefahrenklassen⁴ müssen hier pauschal und ereignisunabhängig gültig sein, was die Festlegung der Klassifizierungsparameter und der Klassengrenzen erschwert.

4.2.5.1 Gefahrenklassifizierung von Senken

Das Merkblatt DWA-M 119 empfiehlt bei belastungsunabhängigen Betrachtungen wie der topografischen GIS-Analyse, die Klassifizierung der Überflutungsgefahr im Bereich von Senken anhand des spezifischen Retentionsvolumens der Senke (bzw. der Retentionshöhe, vgl. Abschnitt 5.3.1.5) vorzunehmen.

Mit der vorliegenden Methodik wird eine Modifikation dieses Ansatzes auf Grundlage umfangreicher Untersuchungen zu den Auswirkungen verschiedener Klassifizierungsvarianten (siehe Abschnitt 5.3.3) vorgestellt und empfohlen. Dabei werden Senken zunächst anhand ihrer Retentionshöhe einer von insgesamt fünf Gefahrenklassen (0 bis 4) zugewiesen (Tabelle 5-9, S. 141). Diese Zuordnung wird anschließend anhand der „Senkengröße“ als Kombination aus Senkenvolumen und Senkentiefe modifiziert, indem ein entsprechender Abzug auf die **Gefahrenklasse GS** berechnet wird (Tabelle 5-11, S. 144). Einzelheiten sind Abschnitt 5.3.3.5 zu entnehmen.

Dieser Klassifizierungsansatz kombiniert über einfache, mathematische Rasteroperationen in GIS drei relevante Senkenparameter (Retentionshöhe h_{Ret} , Senkenvolumen $V_{S,max}$ und max. Senkentiefe $h_{S,max}$). Er beinhaltet zudem eine abgestufte Gefahrenklassifizierung (Zonierung) innerhalb der Senkenausdehnung. Beide Besonderheiten erzeugen ein differenzierteres und sachgerechteres Gefährdungsbild im Bereich von Senken.

⁴ Zur sprachlichen Vereinfachung werden vorliegend die Begriffe „Gefahrenklasse“ und „Gefährdungsklasse“ synonym gebraucht, wie im Übrigen auch in DWA-M 119. Bei der topografischen Gefährdungsanalyse unterscheiden sich „Gefahrenbereiche“ und „Gefährdungsbereiche“ nur durch die (fehlende) räumliche Nähe eines exponierten Risikoobjekts. Streng genommen wäre in Bezug auf Senken und Fließwegen von „Gefahrenklassen“ und bezüglich exponierter Gebäude und Risikoobjekte von „Gefährdungsklassen“ zu sprechen.

4.2.5.2 Gefahrenklassifizierung von Fließwegen

Auf Grundlage der Fließwegakkumulation (Abschnitt 4.2.4) ist das Gefährdungspotenzial entlang der Fließwege sachgerecht zu klassifizieren. Hierzu wird die für jedes Rasterfeld eines Fließweges ermittelte akkumulierte Einzugsgebietsfläche herangezogen, die als Äquivalent zur Größe des bei Starkregen auftretenden Oberflächenabflusses anzusehen ist. In diesem Zusammenhang sind, auch mit Bezug auf eine geeignete Darstellungsform in der Gefahrenkarte, folgende Details festzulegen:

- Mindestfließweglänge bzw. akkumulierte Einzugsgebietsfläche, ab der Oberflächenabflüsse ausreichend groß sind, um eine signifikante Überflutungsgefährdung darzustellen
- Schwellenwerte einer sinnvollen und sachgerechten Gefahrenklassifizierung
- Relevante Fließwegbreiten, die als potenzielle Gefährdungszone entlang eines Fließwegs anzusehen sind.

Zur Festlegung der genannten Parameter sind gesonderte Untersuchungen und Auswertungen am Fallbeispiel erforderlich, deren Einzelheiten in Abschnitt 5.4.1 dokumentiert sind.

Als Resultat stehen entlang der Fließwege und Flutachsen wenige, im vorliegenden Fall vier **Gefahrenklassen GF** (0 bis 3) zur Verfügung, die klassenspezifische Fließwegbreiten aufweisen (siehe Tabelle 5-13, S. 159). Diese Gefahrenklassen fließen in die Bewertung des Gesamtgefahrenpotenzials bzw. der Gesamtgefährdung ein (Abschnitt 4.2.5.4).

4.2.5.3 Berücksichtigung weiterer Gefährdungseinflüsse

Neben den beiden obligatorisch zu identifizierenden Gefahrenbereichen der Senken und Fließwege können je nach Untersuchungsgebiet und Zielsetzung der Gefährdungsanalyse noch weitere Komponenten und Beiträge in die Gesamtbewertung der Überflutungsgefährdung einbezogen werden.

Überstaubeitrag der Kanalisation

Hydraulische Defizite der Regen- und Mischwasserkanalisation zeigen sich in Form unzulässig häufigen Überstaus und sind eine Mitursache für Überflutungsschäden bei Starkregen. Sie liefern insbesondere jenseits der Bemessungsgrenze bei „intensiven Starkregenereignissen“ (gemäß Nomenklatur nach Schmitt et al. 2018), also mit Wiederkehrzeiten bis $T_n = 30$ a bzw. Starkregenindices SRI12 von 3 bis 5 (Schmitt 2017), einen signifikanten Beitrag zur Überflutungsgefahr. Aus überlasteten Kanalnetzgebieten tritt das Abwasser über Straßeneinläufe und Schächte aus und fließt oberirdisch dem örtlichen Gefälle folgend der nächstgelegenen Senke zu. Insofern ist es naheliegend, die Gefahrenklassifizierung von Senken, in deren Einzugsgebiet das Kanalnetz „überstauanfällig“ ist, durch einen entsprechenden **Gefahrenzuschlag GK** zu modifizieren. Es gilt jedoch kritisch zu prüfen, anhand welcher Kriterien dieser

Zuschlag festzulegen ist und wie sich dies auf das Gesamtergebnis der Gefährdungsanalyse auswirkt.

Standardmäßig liefern Überstaunachweise nach Arbeitsblatt DWA-A 118 (DWA 2006a) statistische Aussagen zum Überlastungsverhalten des Kanalnetzes bei Starkregen relevanter Wiederkehrzeiten (z. B. $T_n = 5$ a bis $T_n = 20$ a bzw. SRI12-Werte 3 und 4). Alternativ können netzbezogene Kennziffern zur Bewertung der Kanalleistungsfähigkeit ermittelt werden, bspw. längengewichtete Auslastungsgrade (Klima-Net - Wassersensible Stadtentwicklung 2010) oder zur Gefährdung infolge Schachtüberstaus (Fuchs et al. 2012).

Anhand der verfügbaren Datengrundlage gilt es zu entscheiden, welche Kanalnetz-bereiche und Schächte zu einer überstauinduzierten Gefährdungsverschärfung beitragen, indem beispielsweise die Überstauhäufigkeit $n_{\bar{u}} > 0,1 \text{ a}^{-1}$ beträgt. Die Festlegung der Überstauhäufigkeit muss sich dabei jedoch an den Rahmenbedingungen des betreffenden Kanalnetzes und an dessen Gesamtüberlastungssituation ausrichten (Schmitt und Scheid 2014).

Fehlen Überstauinformationen, kann der Zuschlag GK vereinfachend auch pauschal für solche Bereiche angesetzt werden, zu denen betriebliche Erfahrungen mit regelmäßigen Überlastungen und Wasseraustritten gemacht wurden. Ergänzend können die Bereiche mit markant überstauten Schächten gesondert räumlich dargestellt und mit den Ergebnissen der topografischen Analyse verschnitten werden, um die beiden unterschiedlichen Ursachen möglicher Überflutungen zu betonen.

Die Berücksichtigung eines Zuschlags GK für den gefährdungsverschärfenden Beitrag von Kanalüberstau muss nicht obligatorisch in die topografische Gefährdungsanalyse integriert werden. In der Regel empfiehlt es sich, parallel zur belastungsunabhängigen Starkregengefahrenkarte eine statische Volumenbetrachtung für die Überstauvolumina und Wasseraustritte aus der Kanalisation durchzuführen.

Gefährdungseinfluss urbaner Fließgewässer

Bei der methodischen Berücksichtigung des gewässerseitigen Einflusses auf die Überflutungsgefährdung eines Untersuchungsgebiets ist nach der hydrologischen und hydraulischen Gesamtsituation sowie der Art und Größe der urbanen Fließgewässer zu differenzieren. Während Starkregen in kleineren urbanen Fließgewässern zweifelsfrei auch Hochwasser hervorrufen können, ist es größeren Fließgewässern eher unwahrscheinlich, dass sich die beiden Lastfälle „Flusshochwasser“ und „Starkregenüberflutung / Sturzflut“ kritisch überlagern (vgl. Sartor 1998).

Insofern ist es nicht empfehlenswert, beispielsweise Überschwemmungslinien der Hochwassergefahrenkarten gemäß HWRM-RL (HWRM-RL 2007) für HQ100 oder gar HQ_{extrem} in die Gefährdungsanalyse und Kartendarstellung zu integrieren. Für letztere bestünde sogar die Gefahr, dass die Hochwasserzone großräumig Senken und Fließwege überlagern würde. Sollten jedoch Überschwemmungslinien für häu-

fige Hochwasserereignisse (z.B. für HQ2 bis HQ20) verfügbar sein, kann eine integrierte Betrachtung beider Überflutungslastfälle angezeigt sein, weil sich für solche Situationen auch die Einzeleinflüsse des Überflutungsgeschehens überlagern. Alternativ kann eine pauschale Ausweisung der Gewässer und gewässernahen Bereiche (Gewässerrandstreifen) als Gefahrenzone ebenfalls ausreichend und sinnvoll sein. Für kleinere urbane Fließgewässer lassen sich die Gefahrenzonen in der Regel bereits über die topografische Analyse mit der darin enthaltenen Abbildung entsprechender Fließwege und Flutachsen identifizieren.

Sofern eine Implementierung der „Gefahrenzone Gewässer“ sinnvoll ist, kann sowohl abgestuft über Mindesttiefen als auch pauschal eine **Gefahrenklasse GG** entsprechend der höchsten Gefahrenklasse der Senken festgelegt werden.

Gefährdungseinfluss großer Hangneigungen

Bei der GIS-Analyse zur Senken- und Fließwegeidentifikation werden zwar über das DGM bzw. DOM unmittelbare Informationen zur Topografie verarbeitet, allerdings sind diese beschränkt auf die Neigungsrichtung, nicht den Neigungsbetrag der Rasterfelder. Insofern fehlt eine signifikante Kenngröße zur Quantifizierung der Abflussbildung bzw. Abflussrate des Niederschlagswassers und der Oberflächenfließgeschwindigkeiten. Dies ist insofern bedeutsam, dass damit einhergehende Gefährdungsverschärfungen infolge Bodenerosion in unbefestigten Bereichen (Außengebieten), das Ausspülen von Flächenbefestigungen und das Mobilisieren und Abschwemmen von Feststoffen und Gegenständen als Treibgut bei größeren Geländeneigungen nicht berücksichtigt werden.

Zur vereinfachten methodischen Berücksichtigung größerer Geländeneigungen kann daher bei der Senken- und Fließwegklassifizierung ein **Topografie-Zuschlag GT** auf die Gefahrenklasse vorgenommen werden (siehe Schmitt und Scheid 2014). Wichtig ist jedoch, die Auswirkungen eines solchen Zuschlags auf das Gesamtgefahrenpotenzial, bestenfalls anhand vorhandener Betriebserfahrungen, zu bewerten. Einzelheiten zur methodischen Umsetzung des Topografie-Zuschlags GT sind in Abschnitt 5.2.3.2 ausgeführt.

4.2.5.4 Resultierende Gesamtgefährdung

Die Gefahrenklassen der verschiedenen Gefahrenbereiche sind als maßgebliche Ergebnisse der Gefährdungsanalyse zu einer resultierenden Gesamtgefahr zusammenzufassen, die schließlich die Informationsgrundlage der kommunalen Starkregen-Gefahrenkarte darstellt.

Zunächst ist die **relative Gewichtung der Gefahrenbereiche** bzgl. ihrer Gefahrenklassen festzulegen. Dabei gilt es weniger um die Frage, ob bspw. die Gefahreinstufungen „hoch“ bei Senken und Fließwegen vergleichbar hinsichtlich ihres Gefährdungspotenzials für Überflutungsschäden sind. Schließlich fehlt diese Vergleichbarkeit, da die jeweiligen Klassifizierungen auf Gefahrenindikatoren basieren, die für

verschiedenste Gefahrenprozesse stehen und unterschiedliche Abbildungsgüten bzw. Unsicherheiten aufweisen. Es geht vielmehr darum, die Bedeutung des jeweiligen Gefahrenbereichs für die weitere Berücksichtigung im Zuge der Risikobetrachtungen sachgerecht festzulegen. In Untersuchungsgebieten mit stark bewegter Topografie und großen Außengebietseinflüssen bilden sich bei einer Sturzflut Flutachsen mit großen Sediment- und Treibgutfrachten aus, die ein enormes Schadenspotenzial freisetzen können. Daher ist es sinnvoll, in solchen Fällen der Gefahrenklassifizierung der Fließwege (GF), auch wenn diese methodisch bedingt größeren Unsicherheiten als die Klassifizierung der Senken (GS) unterliegt, eine entsprechend höhere Bedeutung und Gewichtung bei der Gesamtgefahrenbildung beizumessen. Idealerweise sollten solche grundsätzlichen Einschätzungen und Überlegungen bereits durch die Festlegung der Klassenanzahl und insbesondere die numerische Klassenbezeichnung (Klassenwerte) berücksichtigt werden.

Der anschließende Schritt umfasst die räumliche Überlagerung und Kombination der einzelnen Gefahrenbeiträge. Hierzu werden die Gefahrenklassen der Senken und der Fließwege mit den optionalen Beiträgen Kanalnetzüberstau, Fließgewässer und Topografie (siehe oben) GIS-gestützt als rasterweise Maximumbildung nach Gleichung (3) umgesetzt.

$$G = \max(GK_S; GK_F; [GK_G]) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{mit: } GK_S &= GS [+ GK] [+ GT] \\ GK_F &= GF [+ GT] \quad \text{und} \\ [GK_G] &= [GG] \end{aligned}$$

Die resultierende Gesamtgefahrenklasse ergibt sich als Kombination der drei Einzelgefahrenklassen der Senken (GK_S), der Fließwege (GK_F) und optional der Gewässer (GK_G). Die Gefahrenklasse der Senken GK_S setzt sich aus dem Kriterium GS und den optionalen Zuschlägen für Topografie (GT) und Kanalnetzüberstau (GK) zusammen. Für die Gefahrenklasse der Fließwege GK_F wird das Kriterium GF optional um den Topografiezuschlag GT ergänzt. Die optionale Gefährdungsklasse der Gewässer GK_G ergibt sich, sofern berücksichtigt, unmittelbar aus der Klassifizierung des Kriteriums GG.

Die Überlagerung hat als Maximumbildung zu erfolgen, da die höchste der drei Einzelgefahrenklassen die Gesamtgefahr bestimmt. Die ist dort relevant, wo sich einzelne Gefährdungsklassen räumlich überlagern, was standardmäßig im Bereich der Senken der Fall ist, wo definitionsgemäß Fließwege enden. GIS-gestützt lässt sich dies rasterweise sehr einfach realisieren und als Gefahrenkarte visualisieren (Abschnitt 5.5).

4.3 Methodik der Vulnerabilitäts- und Schadenspotenzialanalyse

4.3.1 Überlegungen zur methodischen Umsetzung

Wie in Abschnitt 4 dargelegt, wird die Vulnerabilität vorliegend auf die beiden Komponenten Anfälligkeit und Schadenspotenzial beschränkt und die Exposition parallel zur Vulnerabilität als eigenständige Risikokomponente aufgefasst. Diese engere Definition der Vulnerabilität über nur zwei Komponenten bietet den methodischen Vorteil, dass die Vulnerabilitätsabschätzung für ein Risikoobjekt „lageunabhängig“, d. h. ohne Differenzierung nach der räumlichen Verortung, erfolgen kann. Dennoch ergibt sich die Komplexität dieser Aufgabe vor allem aus der mangelnden Quantifizierbarkeit der Vulnerabilität und ihrer Komponenten. Im Rahmen der Risikoanalyse für Starkregenüberflutungen müssen sich die Bewertungsebenen von Gefährdungs- und Schadenspotenzialanalyse entsprechen. Die Gefährdungsanalyse ermöglicht mit den ermittelten Senken und Fließwegen Aussagen auf der mikroskaligen Ebene (Objektebene). Dementsprechend stellt sich die Frage, wie und anhand welcher (Ersatz-)Größen die Vulnerabilität ebenfalls auf mikroskaliger Ebene abgebildet werden kann. Hierzu werden die nachfolgend beschriebenen, grundsätzlichen Überlegungen angestellt.

Unter Bezugnahme auf die in Abschnitt 2.1.2.1 genannte Definition der Vulnerabilität als die „durch physische, soziale, ökonomische und ökologische Faktoren und Prozesse determinierten Bedingungen, die die Anfälligkeit gegenüber den Auswirkungen von Gefahren erhöhen“ wird ersichtlich, dass sich Vulnerabilität in ihrer Gesamtheit nicht quantifizieren lässt, weil die Gesamtheit der Bedingungen und Umstände, die die Schadensanfälligkeit erhöhen, nicht quantifizierbar ist. Die gleichen Schwierigkeiten bestehen in der umfassenden Beschreibung aller Gefahrenauswirkungen bzw. aller möglichen Schadensausprägungen. Eine Quantifizierung ist bestenfalls ereignisbezogen und in einem eng definierten Rahmen möglich, wenn sowohl die Gefährdungseinwirkung als auch die konkreten Schadensbilder bekannt sind. Die genaue Prozessabfolge vom Eintritt eines gefahrauslösenden Prozesses (hier: Starkregenabfluss) bis hin zum daraus resultierenden Schadensbild, die von der Objektvulnerabilität bestimmt wird, kann nur grundsätzlich und qualitativ beschrieben bzw. bei ausreichend breiter Datengrundlage an Schadensereignissen in Übertragungsfunktionen, z. B. als wasserstandabhängige Schadensfunktion, überführt werden.

Das in Abbildung 4-5 dargestellte Denkmodell soll dies veranschaulichen. Es stellt die Prozessgrößen zeitabhängig in ihrer qualitativen Ausprägung anhand von zwei fiktiven Schadensereignissen A und B dar. Für die beiden Ereignisse stellen sich während der Expositionsphase für ein Risikoobjekt die Gefährdungen A und B mit unterschiedlichen Einwirkungsstärken ein. Diese erzeugen aufgrund der objektspezifischen Eigenschaften die potenziellen Schadensausmaße $S_{\text{pot}}(A)$ und $S_{\text{pot}}(B)$ mit entsprechend unterschiedlichen Intensitäten. Die Schadensausmaße umfassen dabei alle

Schadensdimensionen (tangibel, intangibel). Die Widerstandsfähigkeit des Risikoobjekts wirkt in Form der beiden Größen Robustheit und Pufferkapazität (siehe Abbildung 2-2, Seite 20) dem potenziellen Schadensausmaß entgegen, sodass ein abgemindertes resultierendes Schadensausmaß $S_{res}(A)$ bzw. $S_{res}(B)$ verbleibt. Dieses wird durch die nach Ende der Expositionsphase einsetzende Schadenskompensation, deren Geschwindigkeit bzw. Wirksamkeit von der Bewältigungskapazität definiert wird, abgebaut.

Bei dem fiktiven Beispiel des Ereignisses A kann das vergleichsweise geringe potenzielle Schadensausmaß $S_{pot}(A)$ von der Robustheit des Objektes zwar zunächst hinsichtlich seiner Intensität kompensiert werden. Es kommt allerdings aufgrund der Expositionsdauer dennoch zu einem Schadenseintritt, der vergleichsweise schnell kompensiert werden kann.

Beim Schadensereignis B übersteigt $S_{pot}(B)$ auch in seiner Intensität die Robustheit des Objektes, sodass das Ende der Widerstandsfähigkeit und der Schadenseintritt zeitlich früher einsetzen. Das resultierende Schadensausmaß $S_{res}(B)$ ist größer und auch die Schadensbewältigung dauert länger an. Sie reicht aber aus, um das Schadensausmaß vollständig zu kompensieren, sodass keine Restschäden verbleiben.

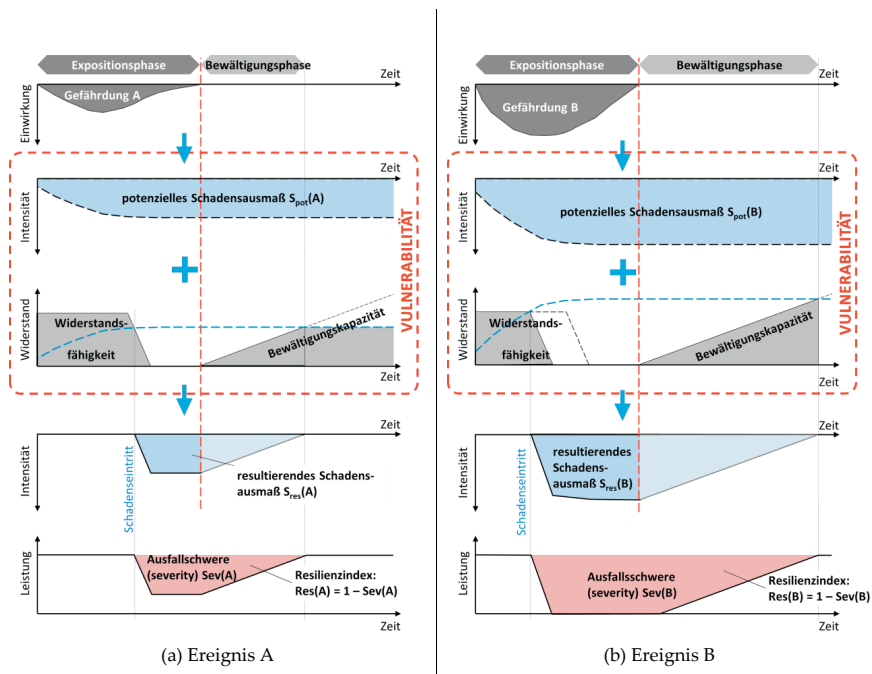


Abbildung 4-5: Denkmodell zur Entstehung von Überflutungsschäden als Resultat der Interaktion von Gefährdung und Vulnerabilität (eigene Darstellung)

Schadensausmaße sind nach diesem Denkmodell bewusst als Flächeninhalt (Integral) mit einem obligatorischen Zeitbezug dargestellt. Dies entspricht in der Regel dem tatsächlichen Schadensverständnis, da ein länger andauernder Schaden, beispielsweise die Beschädigung oder der Funktionsausfall eines Objekts, auch entsprechend größer wahrgenommen wird. Der Intensitätsverlauf des Schadensausmaßes ist ebenfalls stark idealisiert unter der Annahme, dass sich das maximale Schadensausmaß noch nicht zu Beginn des Ereignisses, sondern erst mit fortschreitender Zeit einstellt.

Das dargestellte Schadensausmaß korrespondiert bei Systemen im Übrigen mit der Schwere des Funktions- oder Leistungsausfalls bei einer Überflutung Sev, wie sie beispielsweise auch für urbane (Ab-)Wassersysteme oder deren Einzelkomponenten zur Quantifizierung der Systemresilienz ermittelt wird (z. B. Mugume et al. 2015; Matzinger et al. 2018). Jedoch gilt auch hier, dass es zur Quantifizierung eines eindeutigen Lastfallbezugs und definierter Bewertungskriterien der Systemleistung bedarf. Die beiden Beispiele unterscheiden sich diesbezüglich: Ereignis A führt nur zu einer starken Leistungsminderung, Ereignis B jedoch zum temporären Totalausfall.

Das beschriebene Denkmodell vollzieht eine sehr starke Vereinfachung und Abstrahierung der tatsächlich komplexen und vielfältigen Prozesse der Schadensentstehung. Insbesondere sind die zeitlichen Intensitätsverläufe der Einzelprozesse stark idealisiert angenommen. Es erleichtert jedoch das grundsätzliche Prozessverständnis und verdeutlicht die Schwierigkeiten, die mit einer Quantifizierung der Vulnerabilität verbunden sind. Die Gefährdung als Prozessinput erscheint mit Vereinfachungen noch annähernd gut quantifizierbar, beispielsweise anhand der Dauer und Wassertiefe, mit der eine Überflutung auf ein Risikoobjekt einwirkt. Allerdings tragen auch weitere Komponenten (vgl. Absatz 2.1.1, Tabelle 2-2) zum Gefährdungsausmaß bei.

Das jeweils resultierende Schadensausmaß als Output lässt sich in seiner Gesamtheit nicht explizit bestimmen. Es sind bestenfalls Beobachtungen anhand von tatsächlichen Schadensfällen oder fiktive Was-wäre-wenn-Analysen als grobe Abschätzung möglich, wie es für tangible Schäden auch praktiziert wird. Die Vulnerabilitätsprozesse selbst (in Abbildung 4-5 umrahmt) entziehen sich als *black box* einer Quantifizierung, sodass die im Modell dargestellten Ordinaten lediglich qualitativ die Größen Widerstandsfähigkeit und Schadensausmaß abbilden.

Wird im Sinne der vorgenannten methodischen Festlegung der Vulnerabilität die Bewältigungskapazität ausgeblendet, begrenzt sich das Bewertungsfenster zeitlich auf die Expositionszeitdauer. Diese Vereinfachung trägt dem Sachverhalt Rechnung, dass sich die Bewältigungskapazität ebenfalls nicht hinreichend beschreiben, geschweige denn quantifizieren lässt, wie in Abschnitt 2.1.2.4 dargelegt. Es wird somit unerheblich, ob Rest- oder Folgeschäden (sekundäre Schäden) zu erwarten sind. Eine Ausnahme hiervon stellt die Vulnerabilitätsbewertung von Kritischen Infrastrukturen dar, für die ein gesondertes Augenmerk auf die über die Kritikalität ausgedrückte Schadens- und Ausfalldauer gerichtet wird und für die diese Aspekte bedeutsam sind.

Im Sinne der Definition umfasst die Vulnerabilität ereignisübergreifend das Gesamtspektrum der möglichen Schadensausprägungen. Das Denkmodell verdeutlicht jedoch, dass sie sich nur bezogen auf ein bestimmtes Gefährdungsereignis offenbart und an dessen Auswirkungen, dem Schadensausmaß, bewerten lässt. Dies bedingt die Festlegung eines Referenzereignisses, das sowohl das Gefährdungs- als auch das Schadensausmaß definiert. Vereinfachend wird hierfür das Ereignis, das die maximal mögliche Schadensausprägung hervorruft, als Referenz festgelegt und darüber das Schadenspotenzial als Ersatzgröße für die Bewertung der Vulnerabilität herangezogen, auch wenn aufgrund der *black box* die Gefährdungsausprägung und „Stärke“ dieses Referenzereignisses unbestimmt ist. Über Was-wäre-wenn-Analysen, bei denen für verschiedene Gefährdungsintensitäten die Anfälligkeit und Schadensausmaße eines konkreten Risikoobjekts beurteilt werden, lassen sich Rückschlüsse auf dessen Schadenspotenzial und bedarfsweise dessen Systemresilienz ziehen.

Abbildung 4-6 veranschaulicht diesen Sachverhalt in idealisierter Form als Schadenskennlinien. Diese stellen das resultierende Schadensausmaß für unterschiedliche Gefährdungslagen G_1 bis G_{max} , beispielsweise abgeschätzt anhand systematischer Was-wäre-wenn-Analysen, qualitativ dar. Beispielsweise könnten die beiden Ereignisse A und B aus Abbildung 4-5 die dargestellten Einzelpunkte der Kennlinie des Risikoobjektes 2 sein.

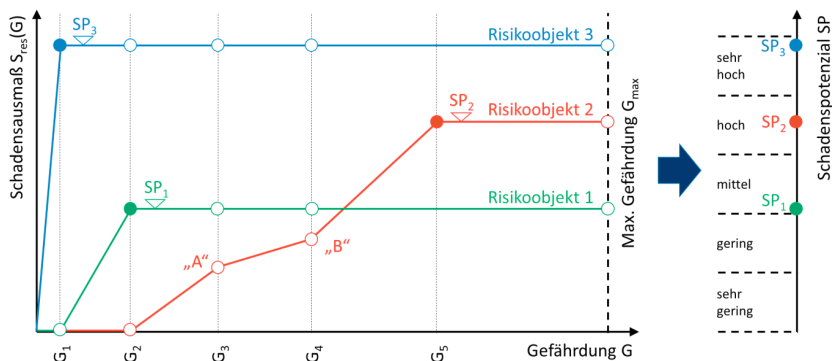


Abbildung 4-6: Schadenskennlinien als Denkmodell zur Bestimmung des Schadenspotenzials und qualitativen Vulnerabilitätsbeschreibung (eigene Darstellung)

Die Darstellungsform der Kennlinien basiert auf dem Zusammenhang, dass mit steigender Intensität der Gefährdung auch das Schadensausmaß bis zu einem Maximum zunimmt, für das sich ein horizontales Plateau einstellt. Dieses Plateau markiert das Schadenspotenzial SP als oberer Grenzwert aller möglichen Schäden. Die Schadenskennlinie charakterisiert damit die Objektivulnerabilität: Je vulnerabler ein Risikoobjekt ist, desto früher wird das Schadenspotenzial SP erreicht und/oder desto höher liegt dieses. Die Vulnerabilität lässt sich dabei als Integral bzw. Flächeninhalt unterhalb der Schadenskennlinie auffassen.

Im Beispiel weist Risikoobjekt 3 demnach die deutlich größte Vulnerabilität von den drei Objekten auf, weil das Schadenspotenzial SP_3 zum einen für ein sehr hohes Schadensausmaß steht und zum anderen bereits bei der vergleichsweise geringen Gefährdung G_1 erreicht wird, für die die Risikoobjekte 1 und 2 nicht anfällig sind. Im Vergleich der Risikoobjekte 1 und 2 erreicht das Schadenspotenzial SP_2 ein höheres Schadensausmaß als das von Risikoobjekt 1; es stellt sich jedoch erst bei einem hohen Gefährdungsausmaß ein. Die Vulnerabilitäten der beiden Objekte wären jedoch aufgrund der Integrale der Schadenskennlinien ungefähr gleich einzustufen.

Dieser (wenn auch hier demonstrativ konstruierte) Vergleich der Risikoobjekte 1 und 2 verdeutlicht, dass Vulnerabilität und Schadenspotenzial nicht äquivalent sind. Bei alleiniger Betrachtung des Schadensausmaßes darf nicht kategorisch von einer Proportionalität von Schadenspotenzial und Vulnerabilität ausgegangen werden. Die im Zuge der Risikoabschätzung für Starkregenüberflutungen durchgeführte Schadenspotenzialanalyse (vgl. Abschnitt 2.3.2.3) reduziert die Betrachtung belastungsunabhängig auf das mögliche Schadensausmaß, das qualitativ bewertet wird (Abbildung 4-6, rechts). Auch wenn sie damit nicht mit einer Vulnerabilitätsanalyse gleichgesetzt werden kann, sind diese groben Vereinfachungen erforderlich, um angesichts der fehlenden Informationsgrundlage zu Schadensereignissen auf Planungsgebietsebene überhaupt zu einer Ersteinschätzung und „Indizienlage“ von Objektivulnerabilitäten zu kommen, die anschließend einzelobjektspezifisch genauer zu bewerten sind.

Mit dem oben formulierten Zeitbezug der Schadensabschätzung auf die Expositionsphase würde vom Grundsatz die Mitbetrachtung von Sekundär- bzw. Folgeschäden, wie sie die Schadenspotenzialdefinition nach DWA-M 119 vorsieht, ausscheiden. Dieser Schadensaspekt sollte dennoch bei klar erkennbarer Relevanz, z. B. im Hinblick auf Dienstleistungs- oder Produktionsausfälle, Umweltschäden, Kritische Infrastrukturen, in grober Abschätzung einbezogen werden.

4.3.2 Indikatoren des Schadenspotenzials von Starkregenüberflutungen

Da Vulnerabilität selbst auf Objektebene nicht umfassend quantifiziert, sondern nur über potenzielle Schadensausmaße abgeschätzt werden kann, werden, wie dargelegt, ersatzweise Schadenspotenzialanalysen durchgeführt. Für Einzelobjekte ist eine solche individuelle Analyse zufriedenstellend möglich, wenn auch mit größerem Aufwand verbunden. Als flächendeckende Anwendung für ganze Untersuchungsgebiete kann das Schadenspotenzial nur grob und pauschaliert abgeschätzt werden. Hierzu bedarf es, wie auch bei der Gefährdungsanalyse, der Festlegung und Anwendung geeigneter Indikatoren.

In Tabelle 4-3 sind den unterschiedlichen Vulnerabilitätsdimensionen typische Schadensarten zugeordnet, die als Parameter einer flächendeckenden Schadenspotenzialanalyse jedoch nicht explizit erfasst werden können. Sie werden stattdessen durch die angegebenen Indikatoren, die anhand öffentlich verfügbarer Datenpools qualitativ bewertbar sind, vertreten. Die methodische Verarbeitung der Indikatoren zu Schadenspotenzialen wird vorrangig für den Gebäudebestand und ergänzend bzw. optional für die Flurstücksflächen eines Untersuchungsgebiets durchgeführt. Wie in (Schmitt und Scheid 2014) empfohlen und in Abbildung 4-7 dargestellt, sollte sich die Analyse jedoch auch gesondert auf weitere überflutungssensible „neuralgische“ Punkte beziehen, die bedingt durch die Datengrundlage weder im Gebäude- noch Flächenbestand geführt sind.

Wie in Abschnitt 2.3.2.3 beschrieben, fehlt bei den bisher dokumentierten Methoden der flächendeckenden Schadenspotenzialanalyse ein klarer Bezug auf die einzelnen Entscheidungs- und Festlegungskriterien zur Klassifizierung des Schadenspotenzials. An diesem Punkt setzt die vorliegende Arbeit methodisch an. In Abschnitt 6 wird ausgehend von der in (Schmitt und Scheid 2014) beschriebenen Methodik die pauschale Klassifizierung des Schadenspotenzials als indikatorbasiertes Bewertungsverfahren in verschiedenen Abstufungen weiterentwickelt.

Tabelle 4-3: Parameter und Indikatoren zur Beschreibung des Schadenspotenzials auf Untersuchungsgebietsebene

Vulnerabilitätsdimension	Schadensarten (Parameter)	Indikator des Schadenspotenzials
physisch (human)	Personenschäden, Schäden an menschlicher Gesundheit und körperlichem Wohlergehen	Nutzungsart Gebäude (SGN); Personenzahl/-dichte (SE)
physisch (nicht-human)	(tangible) Sachschäden, i. W. an Gebäuden und Inventar (tangible) Sachschäden auf Flurstücksflächen	Nutzungsart Gebäude (SGN); Gebäude- und Objektgröße (SA); Bauweise (offen, unterirdisch, Untergeschosse, Wertigkeit) (SB); Nutzungsart Flächen (SFN)
soziokulturell	Sachschäden an Kultur- und Freizeitgütern (tangible, ideell) sowie gesellschaftlich relevanten Objekten; Beeinträchtigungen des gesellschaftlichen Zusammenlebens (Kommunikation, Information, Bildung, Freizeit, etc.)	Nutzungsart Gebäude (SGN), Nutzungsart Flächen (SFN)
ökonomisch	tangible Sachschäden an Wirtschaftsgütern, Produktionsmitteln; Rohstoffen; Unterbrechung und Ausfall von Produktion und Dienstleistungen	Nutzungsart Gebäude (SGN), Nutzungsart Flächen (SFN)
ökologisch	Schäden an Natur und Umwelt als menschlicher Lebensgrundlage: Biotische / abiotische Naturbestandteile und -güter (Flora, Fauna, Ressourcen, Wasser, etc.)	Nutzungsart Gebäude (SGN), Nutzungsart Flächen (auch Land- & Bodennutzung, Biotoptypen) (SFN)

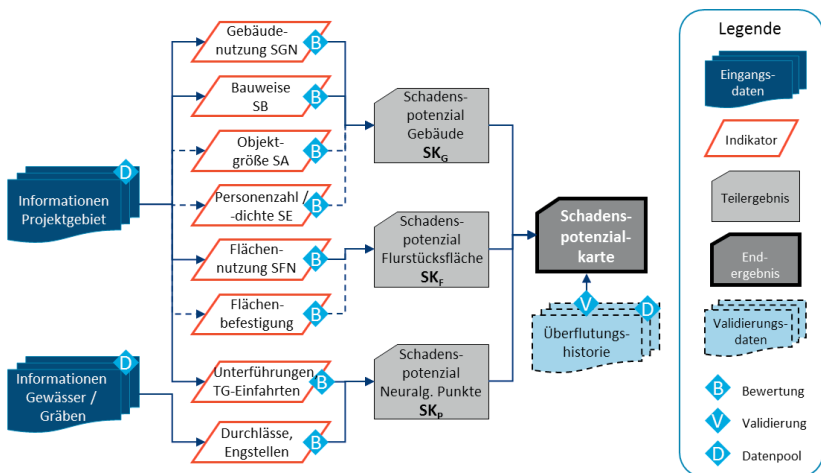


Abbildung 4-7: Systematik der indikatorbasierten Schadenspotenzialanalyse, verändert nach (Schmitt und Scheid 2014)

4.3.3 Bewertung des Schadenspotenzials

Zur Bewertung von Überflutungsrisiken bedarf es analog zur Gefährdungsbetrachtung einer systematischen Kategorisierung und Bewertung des Schadenspotenzials. Mit Bezug auf das gesamte Untersuchungsgebiet erfolgt dies vereinfacht über eine pauschale, qualitative Bewertung anhand von Gebäude- und Flächennutzungen. Diese flächenbezogene Schadenspotenzialanalyse steht auch im Fokus der vorliegenden Methodik, deren Einzelschritte nachfolgend in Anlehnung an Abbildung 4-7 beschrieben werden.

Parallel dazu können Detailanalysen für einzelne Risikoobjekte durchgeführt werden. Diese werden jedoch vorliegend nicht näher behandelt und nur kurz skizziert (Abschnitt 4.3.3.5). Sie kommen aufgrund des hohen Daten- und Bearbeitungsaufwands nur für Einzelbetrachtungen in Frage oder werden als nachgeschaltete Analysestufe im Kontext einer Risikobetrachtung erforderlich.

4.3.3.1 Schadenspotenziale der Gebäude

Bewertungsgrundlage Gebäudenutzung

Wie sich an den und regelmäßigen Berichterstattungen zu Starkregenüberflutungen und den zugehörigen Schadensmeldungen (Anzahl überfluteter Keller, Aufräumarbeiten, Entrümpelungen, etc.) erkennen lässt, kommt dem Bestand an Gebäuden und Mobiliar bei der Identifikation von Überflutungsrisiken und möglichen Schäden eine herausragende Bedeutung zu. Aber auch der potenzielle Verlust von Menschenleben, z. B. durch Ertrinken oder Stromschlag droht in besonderer Weise innerhalb überfluteter Gebäude etwa in Untergeschossen oder Tiefgaragen.

Ungeachtet der enormen Vielfalt an Gebäuden und Risikoobjekten im urbanen Raum und der zugehörigen Heterogenität von Schadenspotenzialen bei Überflutung ist zu deren gebietsweisen Kategorisierung ein einfacher, gut zu verarbeitender methodischer Ansatz zu finden. Dieser muss trotz der datenbedingt erforderlichen Vereinfachung eine ausreichende Verlässlichkeit der Ergebnisse gewährleisten. Der Genauigkeitsanspruch orientiert sich hierbei an einer Erstbewertung, die im Wesentlichen anhand des Indikators **Gebäudenutzung SGN** vorgenommen wird. Einzelheiten zur methodischen Umsetzung dieser Bewertung sind in Abschnitt 6.2 detailliert anhand der nachfolgenden drei Bewertungsansätze beschrieben:

- Pauschale Schadenspotenzialbewertung der Gebäudenutzung auf Grundlage von ALKIS®-Objektwertarten (Ansatz 1)
- Schadenspotenzialbewertung der Gebäudenutzung, getrennt nach Vulnerabilitätsdimensionen (Ansatz 2)
- Schadenspotenzialbewertung der Gebäudenutzung, getrennt nach Vulnerabilitätsdimensionen anhand charakteristischer Schadentypen (Ansatz 3)

Die Ansätze bauen bzgl. ihrer Detaillierung aufeinander auf, sodass die Bewertung nach Ansatz 3 insgesamt am fundiertesten ist und daher empfohlen wird. Resultat dieses Bewertungsansatzes ist eine Kategorisierung des Schadenspotenzials der Gebäudenutzung SGN in insgesamt sechs Klassen (Klasse 0 bis Klasse 5, vgl. Tabelle 6-4, Seite 172), wobei die höchste Klasse 5 der gesonderten Markierung Kritischer Infrastrukturen vorbehalten bleibt.

Ergänzend zur Klassifizierung der Gebäudenutzung sollten je nach Ausrichtung und inhaltlicher Zielsetzung der Schadenspotenzialanalyse noch weitere gebäudebezogene Einflüsse und Indikatoren methodisch berücksichtigt werden, die nachfolgend kurz beschrieben sind.

Überflutungsrelevante Gebäudeeigenschaften und -details

Gebäude mit **Unterkellerung** oder gar in **komplett unterirdischer Bauweise** weisen ein signifikant erhöhtes Schadenspotenzial auf, da diese bereits bei geringen Wasserständen an der Oberfläche und Wassereintritten über tief liegende Gebäudeöffnungen massiv geflutet werden können. Bei unterirdischen Gebäuden ist von einem zusätzlich erhöhten Schadenspotenzial auszugehen, weil sich die komplette Nutzfläche des Bauwerks unterhalb der Überflutungsebene befindet, wodurch sich dort aufhaltende Personen unmittelbar gefährdet sind. Umgekehrt sind aufgeständerte Bauweisen unabhängig von ihrer Nutzung wenig schadensanfällig und stillgelegte, verlassene oder verfallene Gebäude aufgrund der fehlenden Nutzung ohne signifikantes Schadenspotenzial.

Alle diese Aspekte sind methodisch angemessen zu berücksichtigen. Die entsprechenden Informationen können, vorbehaltlich einer zuverlässigen Erfassung, über diverse AKLIS-Objektwertarten bereitgestellt werden. Bei der GIS-technischen Verarbeitung wird die Nutzungsklassifizierung SGN über **summarische oder multiplikative Zusätze SB** modifiziert oder korrigiert. Einzelheiten hierzu sind in Abschnitt 6.2.4.2 dargelegt.

Einfluss der Gebäudegröße

Das Schadenspotenzial von Gebäuden wird neben der Nutzungsart auch maßgeblich von der Objektgröße beeinflusst, wobei hierbei vorrangig die Gebäudegrundfläche als Bewertungsparameter für die bei einer Überflutung betroffene Nutzfläche in Erdgeschoss und ggf. Untergeschossen heranzuziehen ist. Insbesondere bei gewerblichen Objekten ist augenscheinlich, dass mit der Größe der Verkaufs-, Produktions- oder Lagerfläche auch das Schadenspotenzial ansteigt. Aber auch bei Wohnbebauung oder öffentlichen Gebäuden (Verwaltungen, Schulen, Kliniken, etc.) korreliert die Grundfläche erkennbar mit dem möglichen Ausmaß für Personen- und Sachschäden.

Eine nach Gebäude- und Objektgrößen differenzierte Schadenspotenzialbewertung kann durch einfache GIS-gestützte Operationen einfach umgesetzt werden. Es wird

empfohlen, zunächst die Gebäudenutzungsarten hinsichtlich ihrer Größenrelevanz für das Schadenspotenzial zu bewerten. Anschließend sind für diese Auswahl die Grundflächen der Gebäude getrennt nach Nutzungsarten statistisch auszuwerten. Die Randbereiche der statistischen Verteilung (z. B. die 25%- und 75%-Quantilwerte) können durch entsprechende **Zu- und Abschläge SA** um eine Schadenspotenzialklasse berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 4.3.3.4).

Berücksichtigung von Personenaufkommen

Auch wenn Personenschäden bei Starkregenüberflutungen und urbanen Sturzfluten glücklicherweise seltener zu beklagen sind als bei fluvialen Hochwasserereignissen, hat der Schutz von Leib und Leben dennoch auch hier einen hervorgehobenen Stellenwert. Im Rahmen der Schadenspotenzialanalyse werden über die Art der Gebäudenutzung und deren Klassifizierung bereits sehr vereinfacht Ausmaß und Relevanz von Personenschäden bewertet. Vor allem überflutungssensible Infrastrukturen und Objekte, bei denen mit größeren Personenaufkommen oder mobilitätseingeschränkten Personenkreisen (Senioren, Kranke, etc.) zu rechnen ist, lassen sich dabei bereits zuverlässig über die Nutzungsart markieren, auch wenn genaue Personenzahlen fehlen.

Für Wohngebäude, die den größten Bebauungsanteil eines Untersuchungsgebiets ausmachen, ist von wesentlich größeren Streuungen beim Personenaufkommen auszugehen. Die ALKIS®-Objektwertarten liefern hierzu jedoch keine hinreichenden Angaben. Dafür können kommunale Einwohnermeldedaten diese zusätzlichen Informationen bereitstellen. Die entsprechenden Auszüge aus den Melderegistern können nach Abstimmung mit der Kommune anonymisiert und zweckgebunden verwendet werden, vor allem wenn die Schadenspotenzialanalyse ohne externe Vergabe durchgeführt wird. Anhand dieser Datenquelle lassen sich so einzelobjektscharf Anwohnerzahlen zuweisen. Bei entsprechend hohen Personenaufkommen kann damit für einzelne Gebäude ein optionaler **Schadenspotenzialzuschlag SE** definiert werden. Allerdings sollte dieser methodische Schritt auf die Berücksichtigung der Gebäudegröße (s.o.) abgestimmt sein, die ebenfalls als Äquivalent des Personen- und Nutzeraufkommens dient, um Dopplungen zu vermeiden. Ebenso ist zu beachten, dass sich das Überflutungsrisiko in der Regel auf Erd- und Untergeschosse beschränkt, sodass bei Gebäuden mit höherer Geschossanzahl ein solcher Zuschlag fragwürdig ist.

Da die Schadenspotenzialanalyse objektscharf durchgeführt wird, ist die Verwendung von block- oder quartierscharf vorliegenden Einwohnerdichten kein sachge-rechter Ansatz.

4.3.3.2 Schadenspotenziale der Flurstücksflächen

Wie Beobachtungen von Starkregenüberflutungen und urbanen Sturzfluten zeigen, treten bei diesen Ereignissen stets immense Sachschäden auch auf den Flurstücksflächen außerhalb der Gebäude⁵ auf. Mobile Gegenstände und Objekte, wie Pkws oder Lagergüter, werden von den Flutwellen mitgerissen; mitgeführtes Treibgut, Sediment und Geröll beschädigen und zerstören u.a. Außenanlagen, Einfriedungen und Gärten, Verkehrsräume, Flächenbefestigungen und Siedlungsvegetation. Insofern sind ermittelte Senken und Fließwege in der Regel nicht nur Gefährdungsbereiche, sondern auch potenzielle Schadensbereiche. Allerdings stellt sich die Frage, ob und in welchem Umfang diese zu bewerten sind und wie dabei methodisch vorzugehen ist.

Ähnlich wie bei den Gebäuden differieren Schadenspotenzial und Schutzbedürfnis der unterschiedlichen Flurstücksflächen bzw. der sich darauf befindlichen Objekte im Allgemeinen sehr stark. Grundsätzlich wird jedoch auch hier unterstellt, dass das Schadenspotenzial maßgeblich von dem Indikator **Nutzungsart Flächen SFN** beeinflusst wird. Als zentrale Datengrundlage stehen wie bei den Gebäuden die ALKIS®-Nutzungsinformationen (Objektwertarten zur tatsächlichen Nutzung, siehe Abschnitt 6.1.2) zur Verfügung. Für deren unmittelbare Verarbeitung ergeben sich jedoch diverse Besonderheiten und Schwierigkeiten, u.a.:

- Teils große räumliche Ausdehnung der Flurstücke mit stark heterogen verteilten Einzelnutzungen
- Fokus der Schadenspotenzialbewertung auf Sachschäden und ökologische Schäden, weniger auf Personenschäden
- Mögliche Mehrfachzuweisungen von Nutzungsarten mit unterschiedlichen Schadenspotenzialen, die nicht räumlich verortet sind.

In einigen Fällen können zwar zusätzlich räumlich differenziertere Teilflächeninformationen (Wege-, Hof- oder Grünflächen) aus der Erhebung gesplitteter Abwassergebühren verwendet werden, sofern sie als digitales Versiegelungskataster geführt werden (vgl. RISA 2014). Es verbleiben dennoch Bewertungsunsicherheiten, sodass eine flächendeckende Schadenspotenzialklassifizierung nicht obligatorisch empfohlen wird. Ein Beispiel hierfür ist in (Schmitt und Scheid 2014) beschrieben.

⁵ Unter dem vorliegend verwendeten Begriff „Flurstücksfläche“ sind alle Oberflächen eines Flurstücks außerhalb von Gebäuden zu verstehen, abweichend zu der bauplanungsrechtlichen Definition als Gesamfläche des Flurstücks.

Der bereits bauplanungsrechtlich belegte Terminus „Außenfläche“ für Flächen im Außenbereich gem. §35 BauGB wird vermieden. Gleiches gilt für den Begriff „Freifläche“, der nur für i. W. unbebaute Flurstücksflächen gilt, jedoch „bauliche Anlagen“, wie z. B. Verkehrsflächen oder Flächenbeläge ausschließt.

Stattdessen sollte sie auf ausgewählte Einzelflächen begrenzt werden, für die eine Überflutung besonders schadensträchtig wäre und demnach nicht toleriert werden kann. Beispiele hierfür sind:

- Flurstücksflächen Kritischer Infrastrukturen, z. B. Umspannwerke, Abwasserreinigungsanlagen,
- Flurstücksflächen, die gemäß Richtlinie 2008/1/EG des Rates vom 15. Januar 2008 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-RL 2008) als umweltgefährdend im Überflutungsfalle eingestuft sind,
- industrielle Außenlagerflächen, gewerbliche Ausstellungsflächen,
- Flurstücksflächen mit intensiver Aufenthaltsfunktion (Plätze, Erholungs- und Sportflächen).

Eine Klassifizierung des **Schadenspotenzials der Flurstücksflächen SK_F** empfiehlt sich immer auch dann, wenn zugehörige Gebäude signifikant anders genutzt und bewertet sind oder gar fehlen. Sie sollte sich dann an der Klassendefinition der Gebäude (vgl. Tabelle 6-4, Seite 172) orientieren, was die Zusammenfassung zu einem Gesamtschadenspotenzial vereinfacht (Abschnitt 4.3.3.4).

Dort, wo Schadenspotenziale von Gebäuden bereits entsprechend hoch klassifiziert und im Kartenwerk dargestellt sind, ist dieser Schritt nicht erforderlich, da ohnehin eine Mitbetrachtung der Überflutungsrisiken für die umliegenden Flächen erfolgt. Des Weiteren lassen sich eng begrenzte Flächenbereiche oder Einzelobjekte mit hohem Schadenspotenzial besser als gesonderte „neuralgische Punkte“ methodisch berücksichtigen.

4.3.3.3 Schadenspotenziale neuralgischer Punkte

Für einzelne, räumlich eng begrenzte Bereiche von Flurstücksflächen oder in Gebäudenähe existiert ein gesondertes, i.d.R. signifikant höheres Schadenspotenzial bzw. Schutzbedürfnis als in der unmittelbaren Umgebung. Diese „neuralgischen Punkte“ sind als überflutungskritische Bereiche hervorgehoben zu behandeln. Solche Punkte liegen häufig im Bereich von Verkehrsunterführungen, Tiefgaragenzufahrten oder sonstigen Zugängen zu unterirdischen Anlagen und Gebäuden vor, aber auch bei verklausungsgefährdeten Einlaufstellen von Gewässerverrohrungen, Gewässereinfassungen (Brücken, Stege, etc.).

Entsprechende Objektinformationen sind zumindest in Teilen in den Katasterinformationen des ALKIS® verfügbar, andere Informationen, wie Tiefgaragenzufahrten sind ggf. gesondert anhand von Luftbildern bzw. über webbasierte Kartendienste zu erfassen. Einzelheiten hierzu sind in (Schmitt und Scheid 2014) beschrieben und werden vorliegend nicht vertieft. Eine Zusammenstellung verschiedener neuralgischer Punkte mit Klassifizierung ist in Anhang A-7 dokumentiert.

Hinsichtlich der methodischen Implementierung lässt sich nicht klar unterscheiden, ob neuralgische Punkte eher besondere Gefährdungs- oder Schadensbereiche darstellen. Beide Interpretationen sind zulässig. Tiefgaragenzufahrten sind als Gebäudeschwachstellen eher schadensrelevant, während verklausende Durchlässe eher Gefährdungsschwerpunkte darstellen, die ggf. Schäden an anderer Stelle verursachen. In einigen Fällen, wie z.B. bei Unterführungen, sind sie beides, Gefährdungsbereich aufgrund der Senkenlage und Schadensschwerpunkt für Verkehrsteilnehmer.

Vorliegend werden neuralgische Punkte als Schadenspotenzialkomponente geführt, mit einer gesonderten **Schadenspotenzialklasse SK_r** klassifiziert und diese mit den übrigen Komponenten zu einem Gesamtschadenspotenzial zusammengefasst (Abschnitt 4.3.3.4). Zur GIS-technischen Umsetzung und Visualisierung ist eine Abstandszone (Kreisfläche mit mehreren Metern Radius) festzulegen, damit diese kritischen Bereiche ausreichend gut visuell im Kartenwerk in Erscheinung treten.

Alternativ können neuralgische Punkte jedoch auch abseits der Gefährdungs- und Schadenspotenzialanalyse als kategorisch zu überprüfende überflutungskritische Bereiche mit eigener Symbolik in der Risikokarte markiert werden.

4.3.3.4 Resultierendes Gesamtschadenspotenzial

In Analogie zur Gefährdungsanalyse sind je nach Ausgestaltung und Berücksichtigung der unterschiedlichen Komponenten des Schadenspotenzials (Gebäude, Flurstücksflächen, neuralgische Punkte) diese zu einem resultierenden Gesamtschadenspotenzial zusammenzufassen. Dieses wird als entsprechendes Kartenwerk (Schadenspotenzialkarte) ausgewertet und zur Risikoabschätzung weiterverarbeitet. Die GIS-gestützte räumliche Überlagerung (Maximumbildung) ist dabei weniger relevant und eher als Kombination aufzufassen, da sich die drei Beiträge räumlich weitestgehend ausschließen. Von daher ist auch die Frage nach einer relativen Gewichtung der Beiträge nebensächlich.

Die Schadenspotenzialklassifizierung der Gebäude SK_G besteht im Kern aus der Bewertung der Gebäudenutzung SGN, die anhand der in Abschnitt 4.3.3.1 genannten optionalen Beiträge für relevante bauliche Gebäudedetails und -eigenschaften (SB), für die Gebäudegröße (SA) und für erhöhte Personenaufkommen (SE) modifiziert wird, siehe Gleichung (4).

$$S = \max(SK_G; [SK_F]; [SK_r]) \quad (4)$$

mit: $SK_G = SGN [-/+ SB] [+ SA] [+ SE];$
 $[-/+ SB]$ = optionaler Modifikator für relevante Gebäudedetails
und -eigenschaften
 $[+ SA]$ = optionaler Zuschlag für Gebäudegröße
 $[+ SE]$ = optionaler Zuschlag für Personenaufkommen
 $[SK_F]$ = Schadenspotenzialklasse Flurstücksflächen (optional)
 $[SK_r]$ = Schadenspotenzialklasse neuralgische Punkte (optional)

Die Gebäudeklassifizierung selbst sollte nach dem in Abschnitt 6.2.3 vorgestellten Ansatz 3 anhand charakteristischer Schadenstypen vorgenommen und ergänzend in nach Vulnerabilitätsdimensionen getrennten Schadenspotenzialkarten (Abschnitt 6.3) dargestellt werden.

4.3.3.5 Objektbezogene Detailanalyse

Bei der objektbezogenen Detailanalyse wird das Schadenspotenzial anhand der spezifischen Eigenschaften und Merkmale einzelner Gebäude quantifiziert und bewertet. Zur Durchführung bzw. Beauftragung solcher Analysen ist in der Regel der Gebäudeeigentümer verantwortlich.

Neben der Nutzungsart gehen hier noch weitere Details in die Bewertung ein. Bauliche Details, wie z. B. die Relation der Höhenlagen von Gebäudeöffnungen (Zugänge, Zufahrten, Fenster) zum Geländeniveau, Lüftungs- und Lichtschächte, Baumaterialien, aber auch vorhandene Rückstausicherungen oder Objektschutzmaßnahmen beschreiben die Objektfälligkeit bzw. dessen Widerstandsfähigkeit. Detailinformationen zur Raumnutzung der überflutungsgefährdeten Geschosse, zur Wertigkeit von Mobiliar und Inventar oder zur Gebäudetechnik erlauben detailliertere Einschätzungen zu lastfallabhängigen Schadensausmaßen, auch zur Quantifizierung tangibler Schadenspotenziale. Üblicherweise werden solche Detailanalysen anhand von Objektbegehungen mit Fotodokumentation, bedarfsweiser Detailvermessung und Eigentümerinterviews durchgeführt, wobei Checklisten die Analyse und Bewertung standardisieren und erleichtern. Als Beispiele hierfür sind, wenn auch mit unterschiedlichen Erfassungstiefen, der Hochwasserpas für den Bereich Starkregen (Hartmann und Scheibel 2016; HKC o.J.) oder der Resilienzpass des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV 2016) zu nennen.

Tabelle 4-4 dokumentiert den Entwurf einer Detailanalyse für objektbezogene Überflutungsvulnerabilitäten und Schadenspotenziale. Es werden darin einerseits die Widerstandsfähigkeit des Bauwerks anhand der beiden Parameter Robustheit und Pufferkapazität und andererseits das eigentliche Schadensausmaß und Schadenspotenzial über ein Punkteschema bewertet. Die Bewertung erfolgt anhand von 14 Einzelkriterien, die in vier qualitative Klassen eingeordnet werden. Über korrespondierende Punktzahlen (hier von 0 bis 3) kann eine Gesamtbewertung durchgeführt werden, wobei die Einzelkriterien bedarfsweise unterschiedlich gewichtet werden können.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse lassen sich gezielte Vorsorge- und Objektschutzmaßnahmen konzipieren. Durch den gezielten Bezug auf unterschiedliche Überflutungslastfälle und Gefährdungslagen lässt sich die Methode im Sinne einer Wassere-wenn-Analyse als Risikobewertung begreifen, bei der beispielsweise bewertet wird, ab welchen Wasserständen welche Gebäudeöffnungen exponiert sind oder welche konkreten Schadensausmaße bei verschiedenen Überflutungsszenarien zu erwarten sind.

Tabelle 4-4: Entwurf einer objektbezogenen Vulnerabilitäts- und Schadenspotenzialanalyse (ergänzt nach Hatzfeld und Kurz 2010)

Widerstandsfähigkeit (Robustheit, Pufferkapazität)		P	mäßig	P	hoch	P	sehr hoch
Kriterium	nicht vorhanden	0	GOK - 20cm über GOK	1	> 20cm über GOK	2	> 80cm über GOK
Einaufhöhen Gebäudeöffnungen (Zugänge, Zufahrten, Fenster)	unter GOK - niveaugleich GOK	0					
Lichtschiechte	niveaugleich GOK, wasserdurchlässig	0	> 15cm über GOK und wasserdurchlässig	1	> 30cm über GOK und wasserdurchlässig	2	> 30cm über GOK oder wasserdurchlässig
Lüftungsschächte	unterhalb der Entwässerungsebene	0	bis max. 20cm über Entwässerungsebene	1	> 20cm über Entwässerungsebene	2	> 80cm über Entwässerungsebene
Schutz & Entwässerung UG-Zugänge (Keller, Garagen, etc.)	mind. 2 nicht überdachte oder nicht sicher entwässerte UG-Zugänge vorhanden	0	1 UG-Zugang nicht überdacht oder nicht sicher entwässert	1	alle UG-Zugänge überdacht & sicher entwässert (HA)	2	keine UG-Zugänge vorhanden
Baumaterial	<20% aller benetzten Flächen unempfindlich	0	max. 50% aller benetzten Flächen unempfindlich	1	max. 80% aller benetzten Flächen unempfindlich	2	>80% aller benetzten Flächen unempfindlich
Anordnung empfindlicher Ver-/Entsorgungseinrichtungen	Wand- und Sohldurchführungen von Leitungen nicht druckwasserdicht	0					druckwasserdichte Wand- und Sohldurchführungen von Leitungen
Rückstausicherung	nicht vorhanden	0	passive Rückstausicherung (Rückstauschluss) betriebsicher	1	aktive Rückstausicherung (Abwasserhebeanlage)	2	nicht erforderlich bzw. Entlastungspunkte ausreichend
Dauerhafter Objektschutz (automatisiert)	nicht vorhanden	0	bis Wassertiefe 30cm gesichert	1	bis Wassertiefe 50cm gesichert	2	für Wassertiefen >50cm gesichert
Mobiler Objektschutz	nicht vorhanden	0	bis Wassertiefe 30cm gesichert oder lange Aktivierungszeit (> 15min)	1	bis Wassertiefe 50cm gesichert oder mittlere Aktivierungszeit (< 10min)	2	für Wassertiefen >50cm gesichert oder kurze Aktivierungszeit (< 2
Schadensausmaß / Schadenspotenzial		P	hoch	P	mäßig	P	gering
Kriterium	sehr hoch	0	0-30cm über GOK (nicht unterteilt, ca. niveaugleich)	1	> 30cm über GOK (nicht unterteilt, Hochparterre)	2	> 50cm über GOK (nicht unterteilt, Hochparterre)
Höheniveau der untersten Gebäudenutzungsebene	unter GOK (d.h. Keller, UG, Souterrain vorhanden)	0					
Lage / Trennung	nicht überflutungssichere Höhe, nicht getrennt abschalt- und sichere Kreise	0	nicht überflutungssichere Höhe, getrennt abschalt- und sichere Kreise	1	überflutungssichere Höhe, nicht getrennt abschalt- und sichere Kreise	2	überflutungssichere Höhe, getrennt abschalt- und sichere Kreise
Elektronisstationen	nicht getrennt abschalt- und sichere Kreise	0	Öltank auftriebsicher, Behälter nicht gesichert gegen Auftrieb und Auslaufen	1	Öltank auftriebsicher, Behälter auslaufsicher	2	beides auftrieb- und auslaufsicher bzw. nicht vorhanden
Anordnung Öltanks und Behälter mit wassergefährdenden Stoffen	nicht gesichert gegen Auftrieb und Auslaufen	0	nicht auslaufsicher				kein / unempfindliches Inventar im Überflutungsbereich
Fest installiertes (stationäres) Inventar	hochwertiges, empfindliches Inventar im Überflutungsbereich	0	hochwertiges, empfindliches Inventar im Überflutungsbereich	1	kein / unempfindliches Inventar im Überflutungsbereich, mittlerer Räumungsaufwand	2	kein / unempfindliches Inventar im Überflutungsbereich, geringer Räumungsaufwand
Mobiles Inventar	hochwertiges, empfindliches Inventar im Überflutungsbereich, hoher Räumungsaufwand	0	hochwertiges, empfindliches Inventar im Überflutungsbereich, mittlerer Räumungsaufwand	1	kein / unempfindliches Inventar im Überflutungsbereich, mittlerer Räumungsaufwand	2	kein / unempfindliches Inventar im Überflutungsbereich, geringer Räumungsaufwand

4.4 Methodische Umsetzung der Exposition

Gemäß den Festlegungen dieser Arbeit zum Gesamtkonzept einer Starkregen-Risikoanalyse (Abschnitt 4.1) wird die Exposition als eine eigenständige, dritte Risikokomponente angesehen, die jedoch eine Bindegliedstellung zwischen Gefahr und Vulnerabilität (Schadenspotenzial) einnimmt und von diesen beiden Komponenten abhängig ist. Daraus ergeben sich gesonderte Überlegungen zur methodischen Umsetzung der Exposition und ihrer Bindegliedfunktion. Konkret ist dabei die räumliche, ggf. auch zeitliche Übertragung identifizierter Gefahrenbereiche an den angrenzenden Bestand an Gebäuden und Risikoobjekten abzubilden. Die Überlagerung kann GIS-gestützt sehr einfach in unterschiedlicher Detaillierung vorgenommen werden, je nach gewählter Methode der Gefährdungsanalyse.

Bei der einfachsten Umsetzung wird die Exposition als binäre Größe verarbeitet, die auf Basis einer zu definierenden räumlichen Nähe zwischen Gefährdungsbereich und Risikoobjekt den Wert „1“ (TRUE, „Exposition“) oder „0“ (FALSE, „keine Exposition“) annimmt. Der binäre Expositionswert wird dann in GIS über Nachbarschaftsfunktionen auf das gesamte Gebäudepolygon bzw. dessen Rasterfelder übertragen. In einer besseren Alternative können mit dem gleichen Procedere direkt die Gefährdungsklassen von Senken und Fließwegen als Expositionswert auf die Gebäudefelder übertragen werden, da dies ohnehin zur Risikoüberlagerung erforderlich ist. Eine Exposition liegt dann, grob qualifiziert über die Gefährdungsklassen, bei Werten > 0 vor. Diese Information lässt sich leicht in die Gefahrenkarte integrieren (siehe Abschnitt 5.5).

Während die vorgenannte Umsetzung methodenunabhängig anwendbar ist, lassen sich insbesondere für belastungsabhängige Methoden der Gefährdungsanalyse, wie z. B. der gekoppelten 1D/2D-Simulation, differenziertere Verarbeitungen der Exposition umsetzen.

Eine räumliche Quantifizierung der Exposition kann über die Auswertung der Anzahl von Expositionsfeldern (bzw. Dreiecksflächen des TIN) für jedes Gebäude erfolgen. Da in vielen Fällen Gebäude nur in eng begrenzten Bereichen, z. B. an Kellereingängen oder Lichtschächten, exponiert sind, hilft diese Information auch bei einer differenzierteren Bewertung des Objektrisikos. Bei entsprechender Kombination mit den DOM-Höhen bzw. Wassertiefen der Senken lassen sich Aussagen zu Maximalwasserständen am Gebäude oder zur benetzten Fassadenfläche ableiten.

Bei simulationsgestützten Gefährdungsanalysen sind darüber hinaus auch zeitliche Expositionsbeschreibungen möglich.

Letztlich entscheidet die angestrebte Abbildungstiefe der Risikoanalyse über den Detaillierungsgrad in der Verarbeitung der Exposition. Die beschriebenen Detaillierungsmöglichkeiten liefern zwar allgemein zusätzliche Erkenntnisse zur Exposition,

sind jedoch hinsichtlich der Risikoanalyse in ihrer methodischen Verwertbarkeit an die Aussagetiefen der übrigen Risikokomponenten, vor allem der Schadenspotenzialanalyse, gekoppelt. Solange die beschriebenen Unsicherheiten bei der Bewertung der objektspezifischen Anfälligkeit durch fehlende Informationen zu Gebäudeschwachstellen bestehen, sollte im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung die Exposition als binärer Marker zu einer ersten gebietsweiten Risikoabschätzung eingesetzt werden. Detailliertere Betrachtungen, auch zur Exposition, bleiben den weiterführenden Schritten der Risikobewertung auf Einzelobjektebene vorbehalten.

4.5 Methodik der Risikobewertung

Bei der Risikobewertung werden die Einzelanalysen der Risikokomponenten miteinander kombiniert und räumlich überlagert. Konkret werden die Klassenwerte für Gefährdung und Schadenspotenzial zu einem Gesamtwert der Risikoklassifizierung mathematisch oder anhand einer Zuordnungsmatrix verrechnet. Die Exposition als dritte Risikokomponente wird dabei in ihrer Sonderfunktion zur räumlichen Überlagerung genutzt. Insofern beschränkt sich die Risikobewertung methodisch auf eine Zusammenführung von Ergebnissen.

Zur Risikoklassifizierung existieren verschiedene Ansätze, die in Abschnitt 7.1 diskutiert sind. Im Einzelnen geht es dabei um eine sachgerechte Festlegung der Überlagerungsregel, wozu auch die Gewichtung der Einzelkomponenten gehört. Dies bedeutet, dass nach den Empfehlungen des Merkblatts DWA-M 119 (DWA 2016) die gewählten Methoden der Gefährdungs- und Risikoanalyse hinsichtlich Aussagefähigkeit und Genauigkeitsanspruch aufeinander abzustimmen sind.

Im Zusammenhang mit der Risikobewertung sind ebenso geeignete Festlegungen zur Ergebnisvisualisierung im GIS-Kartenwerk zu treffen (Abschnitt 7.2) und auf dieser Grundlage Möglichkeiten der Ergebnisplausibilisierung vorzunehmen (Abschnitt 7.3). Die Risikobewertung bildet schließlich die Grundlage der Risikokommunikation und den Einstieg in ein kommunales Risikomanagement für Starkregenüberflutungen.

5 Untersuchungen zur topografischen Gefährdungsanalyse

Wie in Abschnitt 3 beschrieben, beinhaltet der Workflow der GIS-basierten topografische Gefährdungsanalyse verschiedene Teilprozesse und Arbeitsschritte, deren Ergebnisse einerseits maßgeblich von der verfügbaren und verwendeten Datengrundlage und andererseits von methodischen Details und Festlegungen beeinflusst werden. Zu beidem werden in diesem Abschnitt vertiefende Untersuchungen durchgeführt.

Zunächst erfolgt eine fundierte Einzelbewertung der verschiedenen Datengrundlagen der GIS-gestützten Gefährdungsanalyse mit Beurteilung der Wichtigkeit und Notwendigkeit der einzelnen Datenquellen. Anschließend werden die wichtigsten ergebnisrelevanten Teilprozesse auf die Untersuchungsgebiete Saarbrücken, Hamburg und/oder Neuwied (siehe Abschnitt 3.1) angewendet, analysiert und ggf. vergleichend bewertet. Hierbei handelt es sich im Einzelnen um folgende Teilprozesse und Anwendungsdetails:

- Unterschiedliche Interpolationsansätze DGM1 (Abschnitt 5.2.1)
- Sensitivitätsbetrachtungen zur DOM-Vorglättung (Abschnitt 5.2.2)
- Ansätze zur Gefahrenklassifizierung von Senken (Abschnitt 5.3.3)
- Methodische Berücksichtigung von Senkenüberläufen (Abschnitt 5.3.4)
- Ansätze zur Gefahrenklassifizierung von Fließwegen (Abschnitt 5.4.3)

Im Vordergrund der praktischen Untersuchungen stehen dabei die Auswirkungen auf die Ergebnislage (Sensitivitätsbetrachtungen) aufgrund

- unterschiedlicher Detaillierungsgrade zur Implementierung einzelner Einfluss- und Bewertungskriterien,
- der (abgestuften) Verwendung unterschiedlicher Eingangsdaten und
- unterschiedlicher methodischer und GIS-technischer Einzelschritte und Prozesse.

5.1 Analyse der Datengrundlage

Wie in Abschnitt 4.2.1 dargelegt, ist es bei einer belastungsunabhängigen Methode der Gefährdungsanalyse erforderlich, die vorzugsweise hydraulischen Parameter, die die Überflutungsgefährdung definieren, über geeignete Indikatoren der Gefahrenkomponenten abzubilden. Zur Beschreibung dieser Indikatoren lassen sich unterschiedliche Datengrundlagen heranziehen, wobei sich die Verfügbarkeiten und Qualitäten der einzelnen Datenbestände je nach Projektgebiet unterscheiden können, wie

in Tabelle 5-1 dargestellt. Die Relevanz der Datengrundlagen für den Anwendungsfall Gefährdungsanalyse und die damit erzielbare Aussagefähigkeit und Ergebnisqualität sind jedoch nicht gleich, sodass man von essenziellen bis hin zu nachrangig erforderlichen Daten unterscheiden kann. Diese Beurteilung nach Wichtigkeit und Relevanz ist ebenfalls in der Tabelle vermerkt und wird nachfolgend kurz erläutert.

Tabelle 5-1: Datenpools der topografischen Gefährdungsanalyse mit Bewertung des jeweiligen Datenbedarfs, verändert nach (Schmitt und Scheid 2014)

Datenpool	Datengrundlage	Relevanz
Informationen Projektgebiet	Katasterinformationen (ALKIS®) zu Gebäuden und Flurstücksflächen	++++
	Digitale Orthophotos (ATKIS®-DOP)	++++
	Teilflächendaten zur Oberflächenbefestigung (z.B. Versiegelungskataster)	++
	Boden- und Landnutzungsdaten (z. B. CORINE Land Cover)	++
	Stadtbiototypen, Biotopkartierungen	+
	Hydrogeologische Karten	+
Topografie Projektgebiet	Digitale Gelände- und Oberflächenmodelle (ATKIS®-DGM/DOM)	++++
	3D-Gebäudedaten (LoD1 / LoD2)	++
	Bestandstachymetrie, Detailvermessung	++
	Topografische Karten (TK)	++
	Historische Karten	+
Entwässerungs- infrastruktur	Bestandsdaten: Kanalkataster u. ggf. Grundstücksentwässerungsanlagen	+++
	Entwässerungsdetails natürlicher Außengebiete	+++
	Hydraulische Berechnungen, Überstaunachweise und -statistik	+++
Informationen Gewässer / Gräben	Bestandsdaten Gewässerbauwerke (ALKIS®): Durchlässe, Einbauten, HW-Schutzanlagen	+++
	Bestandsdaten: Längs- und Querprofile, Morphologie	+++
	Hydraulische Kenndaten: Bordvollabflüsse, Wasserspiegellagen, HQx-Linien	++
Legende: (++++) essenziell: methodisch zwingend erforderlich, nicht gleichwertig ersetzbar (+++) vorrangig: methodisch dringend erforderlich, mit maßgeblichem Ergebniseinfluss (++) optional: methodisch nicht zwingend erforderlich, jedoch ergebnisverbessernd (+) nachrangig: geringe methodische Relevanz, ersatzweise für optionale Daten		

Als **essenzielle Datengrundlagen** sind solche Daten anzusehen, die zwingend verfügbar sein müssen, um die Methodik überhaupt anwenden zu können und die sich auch nicht gleichwertig durch alternative Datengrundlagen ersetzen lassen. Für die topografische Gefährdungsanalyse gehören hierzu die amtlichen Liegenschafts- und Topografieinformationen aus ALKIS® und ATKIS® (siehe Abschnitt 2.5). Im Einzelnen werden zur unmittelbaren Beschreibung und GIS-Visualisierung die Katasterinformationen, konkret die Lage von Gebäuden, Flurstücken, Freiflächen, Gewässern, etc. benötigt. Ergänzend liefern Digitale Orthophotos wertvolle zusätzliche Informationen zur Beurteilung der abflussrelevanten Randbedingungen, beispielsweise zur Oberflächenbeschaffenheit, zu oberirdischen Objekten und Strukturen (Einfriedungen, Bordsteine, etc.) oder zur Vegetation. Dass auch das Digitale Geländemodell in bestmöglicher Auflösung (DGM1) als essenzielle Datengrundlage zur Abbildung der Topografie gilt, bedarf keiner weiteren Erläuterung. Die Fragestellungen, die sich aus der Verarbeitung des DGM ergeben, sind gesondert in Abschnitt 5.2 behandelt.

Vorrangige Daten beeinflussen maßgeblich die Ergebnisgüte der Methode. Sie sollen als wichtige Datengrundlage zur Verfügung stehen bzw. beschafft werden und lassen sich nicht gleichwertig, d. h. ohne Inkaufnahme von Ergebniseinbußen ersetzen. Sofern der Einfluss der Entwässerungsinfrastruktur in die topografische Gefährdungsanalyse einbezogen werden soll, fallen hierunter die entwässerungstechnischen Bestandsdaten (Kanalisation, Grundstücks- und Außengebietsentwässerung) sowie Ergebnisse hydraulischer Berechnungen, insbesondere Überstaunachweise und –statistiken, um hydraulische Schwachstellen lokalisieren und implementieren zu können. Die gleiche Datenrelevanz besteht bei gesonderter Berücksichtigung von Abflussbeiträgen urbaner Fließgewässer für die Verwendung dieser Bestandsdaten (z. B. zu Einbauten, hydraulischen Engstellen, Quer- und Längsprofilen).

Durch diverse weitere, **optionale Datenquellen** lassen sich bei der topografischen Gefährdungsanalyse ergänzende Hinweise und Gefährdungsaspekte methodisch einbeziehen, ohne dass diese Daten mit Blick auf die Kernergebnisse zwingend erforderlich wären. Beispielsweise gilt dies für Datengrundlagen wie Versiegelungskataster- oder Landnutzungsdaten, aus denen sich Informationen zur Oberflächenbeschaffenheit und –befestigung und somit Rückschlüsse auf die Abflusswirksamkeit von Teilflächen der Flurstücke oder von unbebauten Außengebieten ableiten lassen. Die differenzierte Festlegung von Abflusswirksamkeiten im Starkregenfall kann je nach Fragestellung sinnvoll und hilfreich sein, auch wenn sie bei einem belastungsunabhängigen methodischen Ansatz nicht allgemeingültig erfolgen kann. Als weitere optionale Daten gelten für den Datenpool Topografie die 3D-Informationen zu Gebäudedächern, mit denen die kleinräumige Abbildung von Senkeneinzugsgebieten oder allgemein die Ergebnisvisualisierung verbessert werden kann. In gleichem Maße können lokale Bestandsvermessungen die Datengüte eines DGM als Verdichtung der Höheninformationen verbessern oder Digitale Topografische Karten bei ausgedehnten Untersuchungsgebieten mit großen Außengebietsanteilen die Beurteilung der Oberflächenabflüsse abseits der DGM1-Datenbasis ermöglichen.

Nachrangige Daten weisen nur eine geringe methodische Relevanz auf. Sie können auch ersatzweise für fehlende, andere Datengrundlagen verwendet werden, wobei dann entsprechende Aussagedefizite der Ergebnisse möglich sind. So lassen sich beispielsweise anhand von Stadtbiooptypen, die in Biotopkartierungen erfasst sind, oder hydrogeologischen Karten ersatzweise die oben bereits genannten Abflusswirksamkeiten abschätzen.

Zusammenfassend ist zu betonen, dass je nach Projektgebiet und der konkreten Fragestellung individuelle Anforderungen an die Datenbasis der Bearbeitung zu stellen sind. Insofern sind gegenüber Tabelle 5-1 auch abweichende Relevanzbewertungen möglich. Darüber hinaus ist die Zusammenstellung nicht abschließend, sodass geobietsspezifisch weitere Datengrundlagen anwendungsrelevant sein können.

5.2 Analyse der Topografie

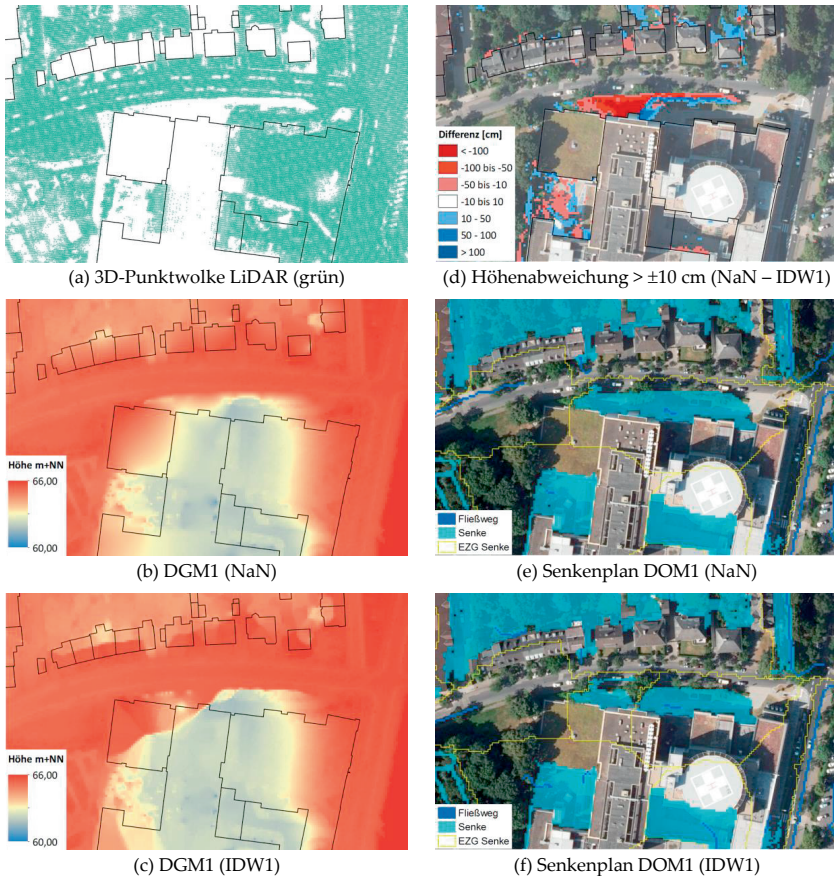
5.2.1 Untersuchungen zur DGM-Interpolation

Als Vorarbeit zur Erzeugung des Digitalen Oberflächenmodells sind im ersten Schritt die per Laserscanning (LiDAR) gewonnenen DGM-Rohdaten (3D-Punktwolken) zu einem flächendeckenden, rasterbasierten Höhenmodell (2,5D) zu interpolieren. Die 3D-Punktwolken beinhalten aufgrund der Elimination aller Nicht-Geländepunkte vorzugsweise in den Bereichen von Gebäuden oder Brücken größere Lücken, wie in Abbildung 5-1 (a) beispielhaft dargestellt. Diese sind vor Implementierung der Gebäude durch eine geeignete räumliche Interpolation wieder zu schließen. Zu diesem Arbeitsschritt bedürfen folgende Fragestellungen einer näheren Untersuchung:

- In welchem räumlichen und höhenmäßigen Ausmaß beeinflusst das gewählte Interpolationsverfahren das Digitale Geländemodell und das daraus abgeleitete Digitale Oberflächenmodell?
- Welchen Einfluss haben unterschiedliche Parameteransätze auf das Interpolationsergebnis (DGM, DOM)?
- Welche Rückschlüsse und Optimierungsansätze ergeben sich aus den vorgenannten Analysen für die weitere Gefährdungsanalyse?

Zunächst werden am konkreten Beispiel (Untersuchungsgebiet 3, Neuwied) die Auswirkungen unterschiedlicher Interpolationsansätze auf die anschließende Fließwege- und Senkenanalyse veranschaulicht. Anschließend werden die durch unterschiedliche Interpolationsverfahren erzeugten DGM anhand ihrer Höhenverteilungen systematisch miteinander verglichen und dabei der Einfluss unterschiedlicher Parameteransätze auf das Resultat eines Interpolationsverfahrens mit betrachtet. Parallel dazu werden die gleichen Betrachtungen für das resultierende DOM durchge-

führt, indem sich der Höhenvergleich auf die Rasterfelder außerhalb des oberirdischen Gebäudebestands beschränkt.



Geodatengrundlage (a) bis (f): © LUWG RP (2017)

Abbildung 5-1: Auswirkungen der Interpolationsansätze NaN und IDW1 auf die Senkenausprägung am Beispiel des Untersuchungsgebiets 3 (Neuwied)

Die für die systematische Analyse ausgewählte Datengrundlage entstammt zwei Teilbereichen des Untersuchungsgebiets 3 (Neuwied) mit Ausdehnungen von 15 km² und 5 km². Datentechnisch setzen sich diese aus 15 bzw. 5 Quadratfeldern mit LiDAR-Punktdaten zusammen. Die größere Ausdehnung A umfasst ca. 88,5 Mio. Hö-

henpunkte bei mittleren Punktdichten zwischen 3,9 Punkte/m² und 7,5 Punkte/m², je nach Gebäudeanteil des jeweiligen Quadratfeldes. Als Interpolationsverfahren werden der Natural Neighbor-Ansatz (NaN) und die Inverse-Distanzenwichtung (IDW) in vier verschiedenen Konfigurationen untersucht und miteinander verglichen (Tabelle 5-2). Es werden dabei sowohl die einzelnen Datenquadrate als auch die Gesamtfläche aller Höhenpunkte verarbeitet und analysiert.

Tabelle 5-2: Untersuchte Interpolationsverfahren: Parameter und Untersuchungsbereiche

Interpolationsverfahren		Parameter	Bereich A (15 km ²)	Bereich B (5 km ²)
NaN	Natural Neighbor	./.	X	X
IDW1	Inverse Distance Weighting	Exponent = 2; 12 Wichtungspunkte (Standard)	X	X
IDW2	Inverse Distance Weighting	Exponent = 0,5; 12 Wichtungspunkte		X
IDW3	Inverse Distance Weighting	Exponent = 2; 6 Wichtungspunkte		X
IDW4	Inverse Distance Weighting	Exponent = 0,5; 6 Wichtungspunkte		X

Mit den vier untersuchten Konfigurationen der IDW-Interpolation wird auf die ergebnisbestimmende Bedeutung der gewählten Eingangsparameter der Gewichtungsfunktion w_i (siehe Gleichung (5) verändert nach Li und Heap 2008) eingegangen. Wesentliche Eingangsparameter sind darin die Anzahl n der genutzten Nachbarpunkte, die wahlweise direkt oder auch über einen Maximalwert der Entfernung d zum Zielpunkt festgelegt wird, sowie der Exponent p zur Gewichtung der Punktentfernung d .

$$\omega_i = \frac{1/d_i^p}{\sum_{i=1}^n 1/d_i^p} \quad (5)$$

Häufig wird als Exponent $p = 2$ angesetzt, was dann sprachlich als Methode IDS (*“inverse distance squared”*) ausgedrückt wird. Mit $p = 0$ ergibt sich ein gleitender Mittelwert aller Nachbarpunkte; $p = 1$ erzeugt eine lineare Interpolation zwischen den Nachbarpunkten. Allgemein wird mit ansteigendem Exponenten p die Interpolationsfläche zunehmend profilierter, weil die zielpunktnahen Nachbarpunkte anteilig stärker gewichtet werden. Umgekehrt nimmt die Glättung bei kleinen Exponenten zu. In der Regel werden Exponenten von $p \geq 2$ empfohlen (Ripley 2004, zitiert in Li und Heap 2008).

Anhand des in Abbildung 5-1 dargestellten Ausschnitts werden die unterschiedlichen Auswirkungen der beiden Interpolationsverfahren NaN und IDW1 veranschaulicht. Es zeigt sich zunächst, dass die aus dem LiDAR-Datenbestand entfernten

Nicht-Geländepunkte zu erheblichen Anteilen auch außerhalb des Gebäudebestands liegen (Abbildung 5-1 a). Im Vergleich der beiden interpolierten DGM zeigt sich, dass der Natural Neighbor-Ansatz (NaN) stärker geglättete Höhenstrukturen und harmonischere Übergänge erzeugt als die Inverse-Distanzen-Wichtung (IDW1) (Abbildung 5-1 b und c). Aufgrund dieser Charakteristika ergeben sich in den Differenzbereichen meist Vorzeichenwechsel, d. h. dass die Höhenwerte eines Interpolationsverfahrens von dem Vergleichsverfahren in enger räumlicher Begrenzung mitunter deutlich sowohl über- als auch unterschätzt werden. Für den in Abbildung 5-1 (d) dargestellten, größeren Bereich nördlich des großen Gebäudekomplexes (Klinikum) betragen die maximalen Differenzen zwischen -2,10 m und +1,36 m. Die Größenordnung dieser Differenzen verdeutlicht die daraus entstehende große Relevanz für die Erzeugung der Senken- und Fließwegepläne im Zuge der Gefährdungsanalyse. Die sich ergebenden Senkenausdehnungen (Abbildung 5-1 e und f) unterscheiden sich sowohl in ihrer räumlichen Ausprägung, hier gemäß IDW1-Ansatz sogar als Aufteilung in zwei Einzelsenken, als auch in ihrer Tiefenstruktur, was wiederum die Gefahrenklassifizierung dieser Senken maßgeblich beeinflussen kann.

Das Beispiel belegt die Notwendigkeit weiterer systematischer Analysen der Höhendifferenzen zwischen den unterschiedlichen Interpolationsverfahren. Es werden dazu für den ausgewählten Bereich A des Untersuchungsgebiets (Größe 15 km²) die Interpolationsverfahren NaN und IDW1 nach Tabelle 5-2 angewendet und anhand der Höhendifferenzen aller Rasterfelder verglichen (Abbildung 5-2, links).

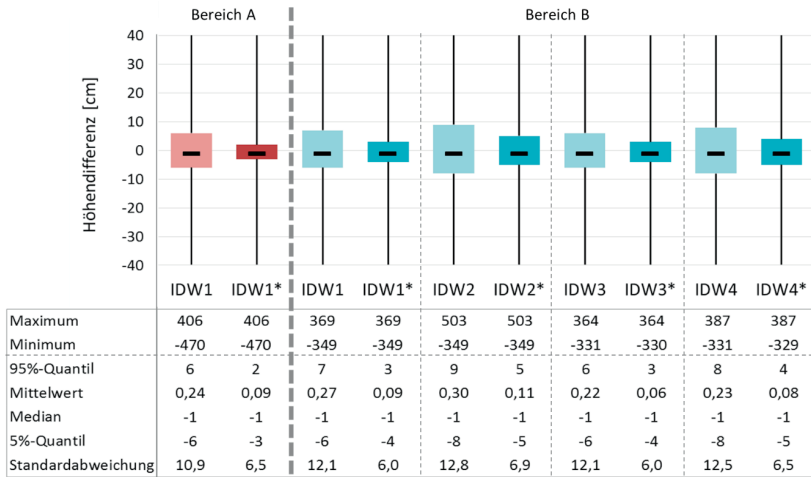


Abbildung 5-2: Streubreiten der Höhendifferenzen zwischen NaN-Interpolation und IDW1 bis IDW4 (IDW1* bis IDW4* ohne Gebäudezonen), Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)

Die Auswertung zeigt, dass die bereits am Beispiel festgestellten Höhendifferenzen durchaus gravierende und für die weiteren Arbeitsschritte ergebnis- und bewertungsrelevante Ausmaße annehmen können: Die Abweichungen streuen zwischen den Maxima $-4,70$ m und $+4,06$ m, treten allerdings nur sehr vereinzelt und ausnahmslos dort auf, wo aufgrund von Punktlücken bzw. geringen Punktdichten die Eigenart des jeweiligen Interpolationsverfahrens zum Tragen kommt. Ansonsten bewegt sich der Großteil (90 %) der Abweichungen zwischen lediglich -6 cm und $+6$ cm und damit noch unterhalb der für ein DGM1 angegebenen Höhenungenauigkeiten (± 10 cm). Aufgrund der bei Interpolation erfolgenden Vergrößerung von mehreren Datenpunkten je Quadratmeter zu einem DGM1-Rasterwert resultieren zwischen den Interpolationsvarianten erwartungsgemäß keine Höhenabweichungen.

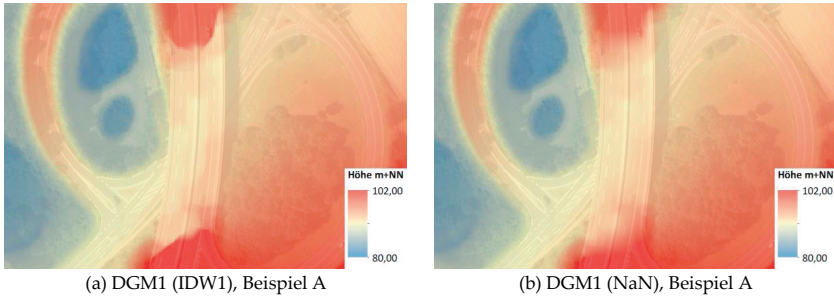
In Datenreihe IDW1* sind die oberirdischen Gebäudebereiche aus der Vergleichsanalyse ausgenommen, um den Vergleich auf das resultierende DOM zu beziehen. Die Extrema der Höhendifferenzen bleiben gegenüber IDW1 unverändert. Sie treten offensichtlich außerhalb der Gebäude und im Bereich anderer Nicht-Geländepunkte (Brücken, etc.) auf. An der Gesamtverteilung der Höhendifferenzen zeigt sich, dass sich die Spannbreite zwischen den Quantilen und die Standardabweichung deutlich verringern, weil ein erheblicher Teil der signifikanten Höhenabweichungen erwartungsgemäß durch die Gebäudeimplementierung nicht mehr zum Tragen kommt. Der Vertrauensbereich zwischen den 5 %- und 95 %-Quantilen liegt im Bereich weniger Zentimeter (-3 cm und $+2$ cm).

Für den kleineren Untersuchungsbereich B werden zusätzlich die Auswirkungen verschiedener Parameteransätze beim IDW-Verfahren untersucht und in gleicher Weise verglichen. Diese Untersuchungen bestätigen die anhand des Bereichs A bereits formulierten Erkenntnisse. Sie ergeben hinsichtlich der Quantilen und Standardabweichungen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Ansätzen und den festgestellten Höhendifferenzen (siehe Abbildung 5-2, Datenreihen IDW2 bis IDW4). Lediglich der Parameteransatz in IDW2 und IDW2* ergibt noch größere Maxima als zuvor ($> 5,00$ m).

Da sich die deutlichsten Abweichungen zwischen den Interpolationsansätzen im Bereich der Nicht-Gebäude-Lücken des DGM ergeben, werden gesonderte Untersuchungen zur Interpolation im Bereich von Brückenquerschnitten durchgeführt. Im Vergleich der beiden Interpolationsansätze zeigt sich, dass hier die IDW1-Interpolation aufgrund der vergleichsweise abrupteren Höhenübergänge im Bereich der Brückenwiderlager etwas realitätsnähere Ergebnisse liefert als die NaN-Interpolation (Abbildung 5-3). Hinsichtlich des Hauptziels einer möglichst zutreffenden Fließwegfortsetzung liefern beide Ansätze jedoch keine signifikanten Ergebnisunterschiede.

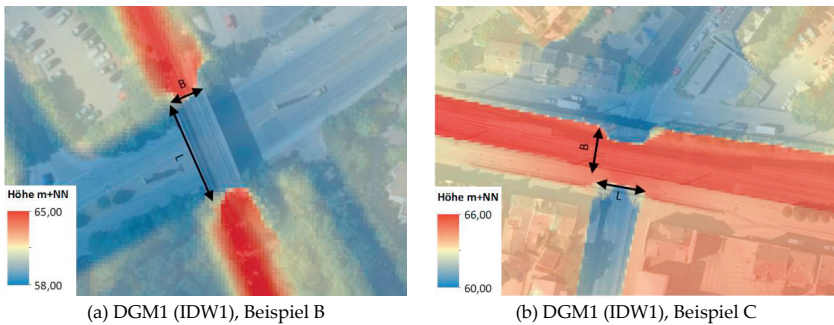
Wesentlich größeren Einfluss haben die geometrischen Abmessungen der Brücke, konkret die Verhältnisse Länge/Breite (L/B) und Länge/Höhe (L/H) des Brückenquerschnitts. Während bei einem großen Verhältnis von Spannweite zu Breite ($L/B \gg 1$)

zufriedenstellende Abbildungen der Höhenverhältnisse erzielt werden (unabhängig vom Interpolationsansatz, siehe Abbildung 5-4 a), ergeben sich für eher gedrungene Brückenöffnungen mit einer Relation $L/B \leq 1$ Sattelflächen mit lokalen Hochpunkten (Abbildung 5-4 b). Solche Sattelflächen als „Interpolationsartefakte“ werden andererseits auch durch kleine Längen-Höhen-Verhältnisse begünstigt, wenn Brücken nicht weit, aber dennoch über größere Tiefen gespannt sind.



Geodatengrundlage: © LUWG RP (2017)

Abbildung 5-3: Auswirkungen der Interpolationsansätze NaN und IDW1 bei der Schließung von DGM-Lücken im Bereich von Brücken, Beispiel A, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)



Geodatengrundlage: © LUWG RP (2017)

Abbildung 5-4: Einfluss der Brückenabmessungen auf die Schließung von DGM-Lücken, Interpolationsansatz IDW1, Beispiele B und C, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur DGM-Interpolation lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Aufgrund der hohen Punktdichten des LiDAR-Datenbestands mit mehreren Höhenpunkten je Quadratmeter wirkt sich im Bereich der Geländeoberfläche der gewählte Interpolationsansatz nicht signifikant auf die resultierenden Höhen des DGM1-Rasters aus.
- Im Bereich der DGM-Lücken, die aus der Elimination von Nichtgeländepunkten des LiDAR-Datensatzes resultieren, hat das gewählte Interpolationsverfahren teils erheblichen Einfluss auf die resultierenden DGM-Höhen, die je nach Topografie mehrere Meter betragen können.
- Da die DGM-Lücken in der Regel eine etwas größere räumliche Ausdehnung haben als die eliminierten Objekte (Gebäude, Brücken, etc.), verbleiben bei der Erzeugung des DOM (durch erneute Implementierung dieser Objekte) Restbereiche mit Höhenwerten, die stark von der gewählten Interpolationsmethode abhängig sind.
- Für diese Restbereiche ist von größeren Fehlern und Höhenabweichungen gegenüber der tatsächlichen Topografie auszugehen. Hinsichtlich der Aussagegenauigkeit der Gefährdungsanalyse kommt diesen Bereichen eine hervorgehobene Bedeutung zu, weil sie naturgemäß unmittelbar an die Gebäude angrenzen und dort methodisch bedingte Senkenlagen darstellen oder umgekehrt tatsächliche Senken „einebnen“ können. Ihre Bedeutung wird damit eminent für die Beurteilung der Gebäudeexposition und letztlich auch des Überflutungsrisikos eines Risikoobjekts.
- Insbesondere im Bereich von Brücken sind größere Abweichungen und Ungenauigkeiten infolge der DGM-Interpolation möglich und gesondert zu prüfen. Dabei wirken sich die geometrischen Randbedingungen (Abmessungen des Brückenquerschnitts) stärker auf die Interpolationsgüte aus als das verwendete Verfahren.
- Diese methodischen Ungenauigkeiten gelten übrigens weitgehend unabhängig von dem gewählten Ansatz der Gefährdungsanalyse. So müssen sich auch 2D- und 1D/2D-Simulationen mit dieser Problemstellung auseinandersetzen, wengleich dort über die Bruchkantenfestlegung bessere Korrekturwerkzeuge zur Verfügung stehen.

Aus den Feststellungen lassen sich folgende Anwendungsempfehlungen ableiten:

- Die Erstellung des DGM bzw. DOM sollte unmittelbar auf Grundlage der LiDAR-Rohdaten bzw. den daraus entwickelten 3D-Geländepunktdateien erfolgen, um die Auswirkungen der Interpolation beeinflussen zu können. Werden bereits von den Vermessungsämtern aufbereitete reguläre DGM1-Raster verwendet, fehlen die Informationen zu den interpolierten DGM-Lücken.

- Auch wenn im Bereich von Brückenquerschnitten die Charakteristik der IDW-Interpolation etwas realitätsnähere Ergebnisse liefert, sollte für den fokussierten Anwendungsfall das DGM vorzugsweise mit Hilfe des Interpolationsansatz Natural Neighbor (NaN) erstellt werden. Dieser liefert stärker geglättete Höhenstrukturen und harmonischere Übergänge, was in den meisten Fällen geeigneter erscheint.
- Es verbleiben dennoch partielle Ungenauigkeiten, die insbesondere dann, wenn sie in Senkenbereichen auftreten, gesondert zu prüfen und zu bewerten sind. Es wird empfohlen, diese Restbereiche je nach Erfordernis aufgrund ihrer größeren Datengenauigkeit in der Gefahrenkarte anhand einer Punktdichteberechnung gesondert zu markieren, um auf das Erfordernis einer gesonderten Prüfung dort ggf. ausgewiesener Gefahrenbereiche hinzuweisen.

5.2.2 Untersuchungen zur DOM-Vorglättung

Wie in Abschnitt 4.2.3 erläutert, bedarf es bei der Vorbereitung der topografischen Gefährdungsanalyse einer Auswahl der bewertungsrelevanten Senken, indem eine Vorglättung des DOM durchgeführt wird. Dabei gilt es, einen Zielkonflikt zu lösen: Einerseits besteht die Notwendigkeit einer visuellen Konzentration und Schärfung der Gefahreninformationen im Kartenwerk durch eine Eingrenzung der Anzahl auf die relevanten Senken kombiniert mit einer aussagekräftigen Fließwegestruktur (klare Ausbildung von Hauptfließwegen und Flutachsen). Andererseits gilt es dabei, unzulässig hohe Informationsverluste und Fehleranteile durch die Manipulation des DOM zu vermeiden.

Da der Arbeitsschritt der Vorglättung in hohem Maße die Ergebnisse der folgenden Prozesse beeinflusst, werden grundsätzliche Untersuchungen zur Herangehensweise sowie zur Festlegung der Glättungs- und Auswahlkriterien durchgeführt und Sensitivitätsbetrachtungen vorgenommen.

Die hierbei untersuchten Varianten umfassen eine DOM-Vorglättung mit drei Mindestsenkentiefern (10 cm, 15 cm und 20 cm), die in der anschließenden Senkenevaluation (Senkenauswahl) mit verschiedenen Zahlenwerten der Auswahlkriterien Senkeneinzugsgebiet, Senkenausdehnung und Senkenvolumen kombiniert werden (Abbildung 5-5). Insgesamt umfasst die Untersuchungssystematik damit 180 Einzelvarianten. Die Bedeutungen der Senkenparameter für die Gefährdungsanalyse sind im Detail in Abschnitt 5.3.1 beschrieben. Es gilt der Grundsatz, dass mit ansteigenden Zahlenwerten der Kriterien das Ausmaß der DOM-Glättung zunimmt.

Da in den weiteren Ausführungen auf ausgewählte Varianten Bezug genommen wird, wurde eine eigene Variantencodierung erstellt, deren Aufschlüsselung in Tabelle 5-3 dokumentiert ist und die auch für die weiteren Prozessschritte beibehalten wird.

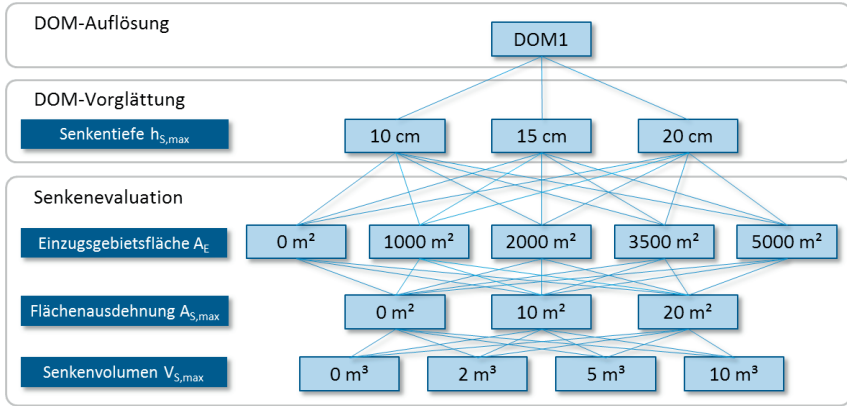


Abbildung 5-5: Systematik der untersuchten Varianten zur Senkenvorglättung und -evaluation

Tabelle 5-3: Variantencodierung zur Vorglättung und Senkenauswahl

Kennbuchstabe	Stellen 1 + 2		Stelle 3		Stelle 4		Stelle 5	
DOM	Senkentiefe		Einzugsgebiet		Ausdehnung		Senkenvolumen	
z. B. „z“ (gemäß DOM-Auflösung, Gebietsgrenzen, etc.)	10	10 cm	0	0 m ²	0	0 m ²	0	0 m ³
	15	15 cm	1	1.000 m ²	1	10 m ²	2	2 m ³
	20	20 cm	2	2.000 m ²	2	20 m ²	5	5 m ³
			3	3.500 m ²			9	10 m ³
			5	5.000 m ²				

Beispiel: Die markierte Wertekombination (10 cm – 5.000 m² - 20 m² - 0 m³) werden als Variante „z10520“ geführt

5.2.2.1 Senkenbezogene Betrachtungen

Bei der senkenbezogenen Untersuchung werden die Vorglättungsvarianten anhand der Kriterien Senkenanzahl, Senkenvolumen und Glättungsvolumen bilanziert und bewertet. Während die verbleibende Senkenanzahl ein Maß für die erzielte Vereinfachung und Strukturierung des DOM darstellt, lässt sich anhand des Glättungsvolumens, absolut bzw. als Glättungsrate in Relation zum verbleibenden Senkenvolumen, das Ausmaß der DOM-Manipulation bewerten. Ergänzend wird geprüft, welche lokalen Auffülltiefen durch die Glättung vorgenommen werden und wie sich diese auf die erzeugten Fließwege und deren Verteilung auswirkt. Kernfragen der Untersuchung sind, ab welchen Einzelparametern die Senkenauswahl zu ungenau wird bzw. ob es Parameterkombinationen gibt, die den beschriebenen Zielkonflikt optimal lösen.

Die Glättungsuntersuchungen wurden für die Untersuchungsgebiete 1 und 2 durchgeführt und senkenbezogen ausgewertet. In Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 ist jeweils eine Auswahl von 12 Vorglättungsvarianten dargestellt. Eine vollständige Dokumentation enthält Anhang A-3. In den Diagrammen aufgetragen sind

- die maximale Auffüllhöhe [m] als größte, eliminierte Einzelsenkentiefe
- der Senkenanteil [%] als Verhältnis von verbleibender Senkenanzahl zur ursprünglichen Senkenanzahl
- die Glättungsrate [%] als das Verhältnis von eliminiertem Senkenvolumen zum ursprünglichen Senkenvolumen.

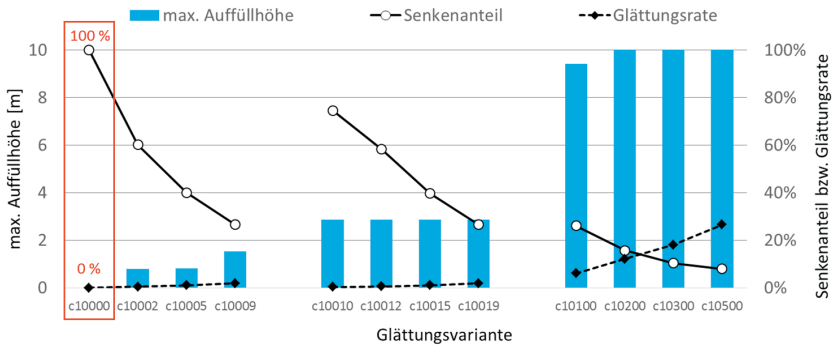


Abbildung 5-6: Senkenbezogene Auswertung ausgewählter Vorglättungsvarianten, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

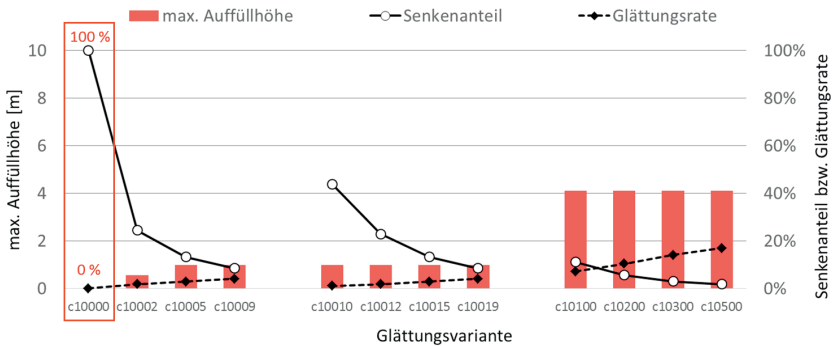


Abbildung 5-7: Senkenbezogene Auswertung ausgewählter Vorglättungsvarianten, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)

5.2.2.2 Fließwegbezogene Betrachtungen

Mit zunehmender Vorglättung lässt sich auch eine veränderte Charakteristik der **Fließwege** erwarten. Das Auffüllen von Senken hat zur Folge, dass die darin befindlichen Fließwegendpunkte eliminiert und damit alle dort endenden Fließwege fortgesetzt und entsprechend verlängert werden. Es wird vorliegend analysiert, in welchem Ausmaß sich damit gezielt Hauptfließwege und Flutachsen, die sich bei besonders starken Abflussereignissen einstellen, hervorheben lassen.

In Abbildung 5-8 (a) ist dazu dargestellt, wie sich die **Anzahl der Fließwegzellen** insgesamt und klassifiziert nach der akkumulierten Einzugsgebietsgröße für verschiedene Glättungsvarianten verändern. Den Betrachtungen liegt eine Fließweggenerierung mit D8-Algorithmus (O'Callaghan und Mark 1984) und einer Mindesteinzugsgebietsgröße von $A_U = 0,5$ ha als Darstellungsschwellenwert der Fließwegzellen zu Grunde. Erkennbar ist die deutliche Zunahme der Fließwegzellen bei zunehmend starker Vorglättung gegenüber der Grundvariante c10000 des Prescreenings. Diese beträgt bis zu 58 % (bei Variante c10529).

Anhand der relativen Anteile der Fließwegklassen in Abbildung 5-8 (b) zeigt sich jedoch, dass sich der absolute Zuwachs an Fließzellen nur tendenziell auf die Verschiebung der Klassenanteile hin zu größeren akkumulierten Flächen auswirkt: Die Reduktion der Längensklasse 0,5 ha – 1,0 ha (-7,1 %) verteilt sich auf entsprechende Zuwächse der übrigen Längensklassen von nur +0,6 % bis zu +3,3 %.

Die damit verbundenen Auswirkungen auf die Gefahrenbeurteilung entlang der Fließwege sind in Abschnitt 5.4.3 thematisiert.

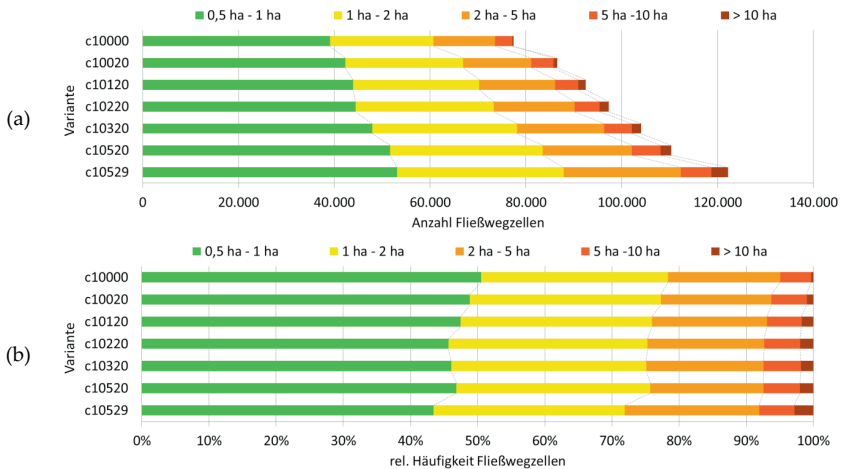
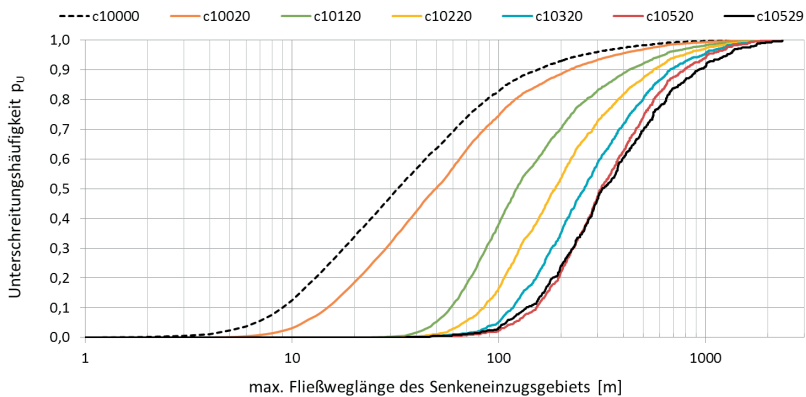


Abbildung 5-8: (a) Absolute und (b) relative Klassenhäufigkeiten der Fließwegzellen für ausgewählte Vorglättungsvarianten, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

Anhand einer weiteren Auswertung wird überprüft, wie sich unterschiedliche Glättungsvarianten auf die **längsten Fließwege** der einzelnen Senkeneinzugsgebiete auswirken.

Die in Abbildung 5-9 dokumentierten Häufigkeitsverteilungen der maximalen Fließweglängen je Senkeneinzugsgebiet für die gleiche Auswahl von Glättungsvarianten bestätigen den bereits erläuterten Verschiebungseffekt hin zu tendenziell größeren Fließweglängen. Der Median der längsten Fließwege je Senke verschiebt sich von 32 m bei der Grundvariante c10000 auf immerhin 317 m bei der Variante mit dem stärksten Glättungseffekt (c10529), deren Minimum bei 36 m Fließweglänge beginnt.

Ergänzend dazu dokumentiert Tabelle 5-4 für die in Variante c10529 verbleibenden Senken, wie sich deren maximalen Fließwege über die verschiedenen Glättungsvarianten gegenüber der Grundvariante c10000 verlängern. So ergibt sich beispielsweise, dass sich bei der weitreichendsten Glättungsvariante (c10529) an 23 % der Senkentiefpunkte ein gegenüber der Grundvariante c10000 verlängerter Fließweg einstellt, der im maximalen Fall ca. 1,7 km beträgt.



Variante	c10000	c10020	c10120	c10220	c10320	c10520	c10529
FW-Anzahl	10.395	5.500	2.128	1.337	889	689	495
Maximum [m]	2.353	2.353	2.353	2.353	2.353	2.353	2.353
Median [m]	32	50	122	187	259	313	317
Minimum [m]	1	5	25	34	36	36	36

Abbildung 5-9: Häufigkeitsverteilung der maximalen Fließweglängen je Senkeneinzugsgebiet für ausgewählte Vorglättungsvarianten, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

Tabelle 5-4: Auswertung der Verlängerung der maximalen Fließwege je Senke für unterschiedliche Vorglättungsvarianten gegenüber der Grundvariante c10000, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

Variante	c10020	c10120	c10220	c10320	c10520	c10529
Anzahl der von einer Fließwegverlängerung betroffenen Senkentiefpunkte	202	327	404	448	483	522
Anteil [%]	9 %	14 %	18 %	19 %	21 %	23 %
Maximale Fließwegverlängerung [m] gegenüber Variante c10000	799	933	933	933	933	1.741

Bewertungsgrundlage:

Senkenbestand nach Variante c10529 (495 Senken mit 2.307 Senkentiefpunkten bzw. Fließwegendpunkten)

5.2.2.3 Diskussion und Erkenntnisse

Es werden nachfolgend die Untersuchungsergebnisse diskutiert und daraus die wichtigsten Erkenntnisse und Empfehlungen abgeleitet.

- Die Untersuchungen zeigen gebietsunabhängig, dass sich eine für die Zielsetzung der DOM-Vereinfachung akzeptable Reduzierung der Senkenanzahl nur durch gravierende DOM-Manipulation mit entsprechend hohen lokalen Höhenabweichungen erreichen lässt. Dies ist insbesondere in dem topografisch bewegten Untersuchungsgebiet 1 erkennbar.
- Wird die Einzugsgebietsgröße einer Senke in die Auswahl einbezogen, resultieren in beiden Untersuchungsgebieten bereits bei einer Mindesteinzugsgebietsgröße von 1.000 m² neben einer deutlichen Reduzierung der Senkenanzahl große Auffüllhöhen im geglätteten DOM (siehe Abbildung 5-7, rechte 4er-Gruppen). Mit weiter zunehmender Einzugsgebietsgröße kommt es zudem zu einem deutlichen Anstieg des Glättungsvolumens (z. B. ca. 25 % bei Variante c10500 in Untersuchungsgebiet 1).
- Die mit der DOM-Glättung verbundene Reduzierung der Senkenanzahl und -volumina führt zu einer Aggregation der Senkeneinzugsgebiete. Je nach Ansatz wirkt sich dies auf die nachfolgende Gefahrenklassifizierung der Senken aus, insbesondere bei Verwendung der Retentionshöhe h_{Ret} (siehe Abschnitt 5.3.1.5). Andere Klassifizierungsparameter der Senken sind weniger stark glättungsabhängig (h_{max} , V_{max}).
- Die mit der Glättung parallel einhergehende, tendenzielle Verlängerung der Fließwege lässt sich anhand des Zuwachses der Fließweggerasterfelder, im gewählten Beispiel von ca. 58%, deutlich belegen. Es ergeben sich somit auch klarere Darstellungen der Fließwegstruktur im Kartenwerk. Allerdings fallen die Zuwächse an Fließwegen mit großen akkumulierten Einzugsflächen nicht überproportional hoch aus.

Daraus lassen sich folgende Schlussfolgerungen und Empfehlungen ableiten:

- Die Mindestsenkentiefe ist als Glättungsparameter in hohem Maße ergebnissensitiv und sollte maßvoll festgelegt werden. Sie ist zum einen an die topografische Charakteristik des Untersuchungsgebiets anzupassen, wobei flache Gebiete sensitiver auf die Glättung reagieren als stärker bewegte. Zum anderen sollte sie nicht die Höhengenaugigkeit des zugrunde liegenden DGM überschreiten. Insofern ist die vorliegend verwendete **Mindesttiefe von 10 cm** ein geeigneter Richtwert. Vergleichende Untersuchungen zur Vorglättung mit einer Mindesttiefe von 15 cm (vorliegend nicht gesondert dokumentiert), belegen, dass sich die Glättungsergebnisse beider Ansätze deutlich unterscheiden.
- Der Parameter Senkeneinzugsgebietsgröße sollte nicht als Glättungs- und Auswahlkriterium verwendet werden, weil er einerseits keinen unmittelbaren Bezug zur Senkengeometrie und damit zum Gefahrenpotenzial einer Senke aufweist und andererseits Überlaufteffekte vollgefüllter Nachbarsenken unberücksichtigt bleiben (vgl. Abschnitt 5.3.4). Es ist nicht auszuschließen, dass durch bereits moderat gewählte Mindesteinzugsgebietsgrößen gefährdungsrelevante Senken irrtümlich geglättet werden.
- Die durch Vorglättung erzeugten topografischen Höhenabweichungen und Informationsverluste wirken sich unmittelbar auf die Ergebnisse der nachfolgenden Prozesse aus. Aus diesem Grund sollte die Vorglättung bewusst vorsichtig, d. h. mit einer zurückhaltenden Auswahl und Festlegung der Glättungsparameter (wenige Parameter, kleine Zahlenwerte) erfolgen. Entsprechende Untersuchungen zum Einfluss der Vorglättung auf die Gefahrenklassifizierung und die daraus resultierende Gebäudeexposition beschreibt Abschnitt 5.3.3.6. Es zeigt sich, dass bereits bei moderater Glättung über das Senkenvolumen oder die Senkenausdehnung lokal vergleichsweise große Höhenabweichungen zum ursprünglichen DOM auftreten. So zeigen die Anwendungsbeispiele, dass selbst bei einem Volumengrenzwert von 2 m³ bereits lokale DOM-Auffüllhöhen von mehr als 50 cm auftreten. Die betroffenen Senken sind nach gesonderter Prüfung der vorliegenden Situation von der Glättung auszunehmen, zumal es sich bei dieser Parameterkombination (Volumen und Ausdehnung gering, dennoch tief) um Lichtschächte, Treppenabgänge etc., also überflutungssensible Bereiche handeln kann. Aufgrund ihrer Ergebnissensitivität wird daher die **Auffüllhöhe** als wichtigstes Bewertungskriterium des gesamten Glättungsergebnisses angesehen, die gesondert zu beachten und bei einer Größenordnung von **50 cm oder mehr** stets kritisch zu prüfen ist.
- Insgesamt muss sich die Festlegung „passender“ Zahlenwerte der Glättungsparameter an den jeweiligen topografischen Randbedingungen (Neigungsverhältnisse, urbane Bebauungsstrukturen, etc.) orientieren. Unterschiedliche Gebietseigenschaften (Neigungsverhältnisse, urbane Bebauungsstrukturen, etc.) bedingen auch unterschiedliche Glättungsgrenzwerte. Ein pauschaler,

gebietsweit gültiger Grenzwert stellt somit immer ein Kompromiss dar, dessen Auswirkungen auf verschiedene Einzelbereiche des DOM sorgsam (z. B. anhand der maximalen Auffüllhöhen und der Glättungsrate) zu überprüfen sind, insbesondere bei flacher Topografie des Untersuchungsgebiets. Hinsichtlich des Verhältnisses von Glättungsvolumen zum ursprünglichen Senkenvolumen wird empfohlen, eine **Glättungsrate von maximal 10 %** einzuhalten. Diese Empfehlung ist ebenfalls als eine, aus den Fallbeispielen abgeleitete Orientierungsgröße anzusehen, die stets einer kritischen Einzelfallprüfung zu unterziehen ist.

- Die vorgenannten Empfehlungen zur Senkenidentifikation lassen sich nicht zufriedenstellend mit der Zielsetzung der Fließweggenerierung vereinbaren, die die Ausweisung klarer Fließwegestrukturen und Berücksichtigung möglicher Senkenüberläufe nach Vollfüllung verfolgt. Es wird daher empfohlen, mit einer gesonderten Variante, die eine stärkere DOM-Vorglättung und Senkenfüllung vornimmt, eine aussagekräftige Fließwegestruktur zu erzeugen und beide Teilinformationen (Senken und Fließwege) anschließend als Grundlage der Gefahrenklassifizierung zu kombinieren (siehe Abschnitt 4.2.5.4). Zur fließwegbezogenen Vorglättung eignet sich ein entsprechend hoher Grenzwert der Retentionshöhe h_{Ret} .
- Die Stärke der Vorglättung wirkt sich ebenso signifikant auf die Fließwegverteilung aus, was zur Verdeutlichung des Oberflächenabflussgeschehens bei Starkregen im Kartenwerk beiträgt. In welchem Ausmaß dies auch das Gefahrenpotenzial entlang der Fließwege beeinflusst, wird in Abschnitt 5.4.3 untersucht.

In den vorliegenden Anwendungsbeispielen (Untersuchungsgebiete 1 und 2) bildet eine DOM-Vorglättung mit einer Mindestsenkentiefe von 10 cm und einem Mindestsenkenvolumen von 2 m^3 (Variante z10002) die Grundlage der anschließenden Arbeitsschritte zur Senkenklassifizierung. Zur Gefahrenklassifizierung entlang der Fließwege basiert die DOM-Vorglättung auf einem Grenzwert der Retentionshöhe von $h_{Ret} \geq 200 \text{ mm}$.

5.2.3 Geomorphologische Analyse

5.2.3.1 Höhenverteilung (Hypsometrie)

Zur Analyse der Höhenverteilung jedes Untersuchungsgebietes wurden auf Grundlage der Digitalen Geländemodelle hypsometrische bzw. hypsografische Kurven erstellt (Abbildung 5-10). Diese finden in der topografischen Geländeanalyse und Geomorphologie seit vielen Jahren breite Anwendung, u. a. zur Analyse erosiver Geländeprozesse eines hydrologischen Einzugsgebiets (Langbein 1947; Strahler 1952; Luo 1998). Hypsometrische Kurven wurden von Langbein (1947) entwickelt und stellen die Verteilung verschiedener Höhenstufen eines topografischen Gebiets mit den

zugehörigen Flächenanteilen dar. Die Darstellung erfolgt wahlweise mit Absolutwerten oder in normierter Form. In Ordinatendrichtung wird die Höhendifferenz und entlang der Abszissenachse wird die zugehörige Fläche bzw. der Flächenanteil an der Gesamtfläche aufgetragen. Während die Absolutwertdarstellung eine höhere Anschaulichkeit bietet, weil sich neben den realistischen Größen- und Ausdehnungsrelationen auch ebene Terrassenstrukturen und Höhenplateaus entsprechend grafisch visualisieren lassen, erlaubt allein die normierte Darstellung einen direkten Vergleich unterschiedlicher Gebiete (Strahler 1952).

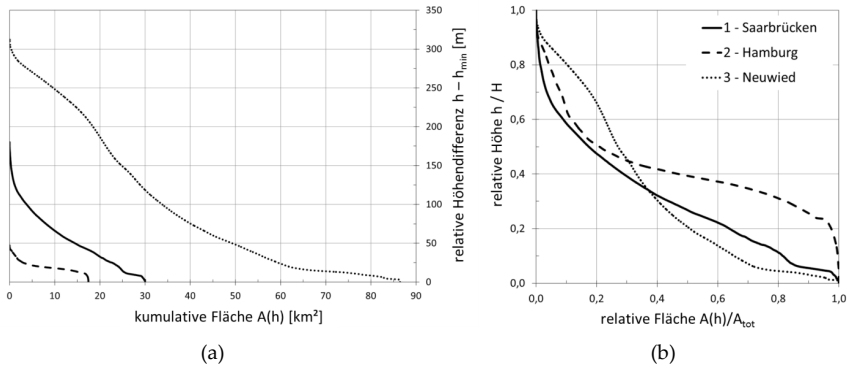


Abbildung 5-10: Hypsometrische Kurven der Untersuchungsgebiete 1 bis 3: (a) kumulativ und (b) normiert nach Langbein (1947)

Aus der hypsometrischen Kurve können neben der allgemeinen Veranschaulichung der Höhenverhältnisse auch hydrologische Informationen abgeleitet werden. Entsprechende Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Hypsometrie und Abflussbildung, die konkret über die Parameter Abflussscheitel und Anlaufzeit an fiktiven Niederschlag-Abfluss-Modellen untersucht wurden, beschreibt Howard (1990). Allerdings lassen sich diese Ergebnisse nicht unmittelbar auf den Anwendungsfall der GIS-gestützten Gefährdungsanalyse übertragen bzw. es wäre dafür erforderlich, hypsometrische Verteilungen für jedes einzelne Senkeneinzugsgebiet zu erstellen, was mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand verbunden wäre.

Als vergleichsweise einfache Alternative zur Berücksichtigung der Höhenverhältnisse in den Senkeneinzugsgebieten kann die absolute bzw. flächenbezogene Höhendifferenz für einen möglichen Gefährdungszuschlag herangezogen werden, da diese Parameter problemlos über die statistischen Kennwerte der Senken anhand des DGM generierbar sind.

5.2.3.2 Neigungs- und Gefälleverteilung

Die Hangneigung wird als primärer Geländeparameter (*primary terrain attribute*) standardmäßig bei der digitalen Geländeanalyse ausgewertet und wahlweise in Grad oder Prozentwerten angegeben. Im vorliegenden Kontext ist sie als Geländegefälle eine signifikante Kenngröße zur qualitativen Abschätzung von Oberflächenfließgeschwindigkeiten und Abflussraten des Niederschlagswassers von Bedeutung: Grundsätzlich gilt, dass stärker geneigte Oberflächen geringere Verlustraten bei der Abflussbildung aufweisen und demnach unmittelbarer und stärker abflusswirksam sind als ebene oder flach geneigte Flächen bei ansonsten gleicher Beschaffenheit.

Es existieren unterschiedliche Ansätze zur Klassifizierung der Hangneigung. Vorliegend wird auf die Klassifizierung gemäß (Ad-hoc-AG Boden 2005) Bezug genommen. Diese unterscheidet in sieben Neigungsstufen von N 0 (nicht geneigt) bis N 6 (steil). Für die drei Untersuchungsgebiete wurden die prozentualen Anteile der Neigungsstufen N 0 bis N 6 ausgewertet und verglichen (Abbildung 5-11). Erwartungsgemäß weicht die Neigungsverteilung des Untersuchungsgebiets 2 (Hamburg) signifikant von den beiden „Mittelgebirgsgebieten“ Saarbrücken und Neuwied ab: Der überwiegende Teil des Untersuchungsgebiets Hamburg ist mit 80 % maximal „schwach geneigt“ (N 0 bis N 2) gegenüber 46 % bzw. 55 % bei Saarbrücken und Neuwied. Umgekehrt sind die stark geneigten bis steilen Bereiche (N 4 bis N 6) in Hamburg äußerst gering (ca. 6 %), während sie in den Gebieten Saarbrücken und Neuwied mit ungefähr einem Viertel der Gesamtfläche vertreten sind. Die Neigungsverteilungen der Gebiete Saarbrücken und Neuwied ähneln sich stark, wobei in Neuwied die Randklassen N 0 und N 6 stärker vertreten sind und somit eine heterogenere Neigungsverteilung vorliegt als in Saarbrücken.

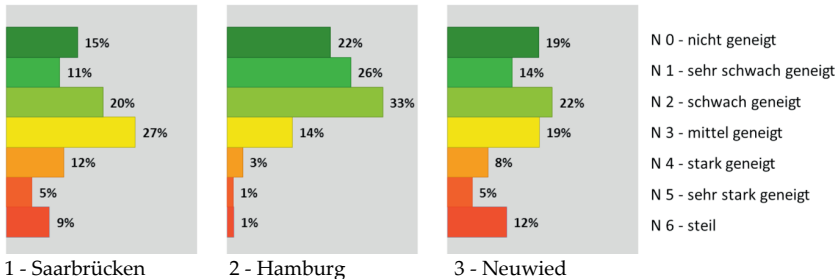
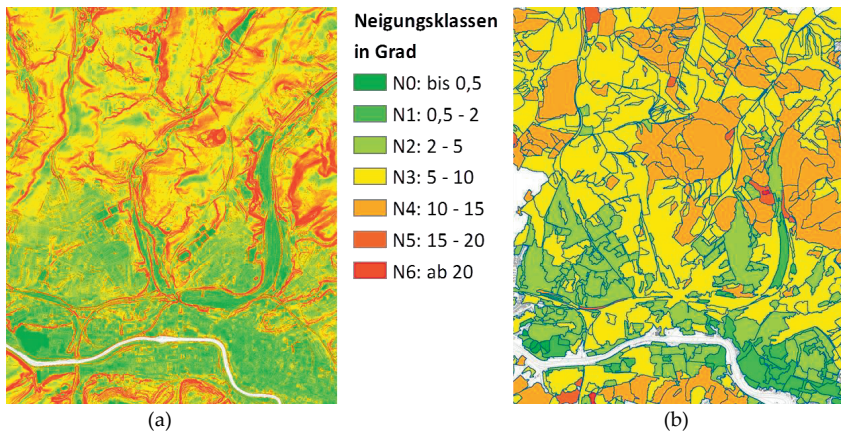


Abbildung 5-11: Verteilung der Hangneigungsstufen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) für die Untersuchungsgebiete 1 bis 3

Die Geländeneigung kann neben der allgemeinen Charakterisierung der Topografie der Untersuchungsgebiete auch unmittelbar methodisch in die Gefährdungsanalyse implementiert werden, indem Fließwege und Senken bei größeren Neigungsverhältnissen

nissen Gefährdungszuschläge (GT) erhalten (Schmitt und Scheid 2014, siehe Abschnitt 4.2.5.3). Entsprechende Auswertungen wurden am Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken) durchgeführt und zeigen, dass die bei rasterscharfer Berechnung entsprechend hoch aufgelöste Neigungsverteilung zwar gute visuelle Informationen für gesonderte Detailbetrachtungen liefert, jedoch hinsichtlich einer methodischen Weiterverarbeitung zur ersten flächendeckenden Identifikation abflusskritischer topografischer Randbedingungen nicht optimal geeignet ist. Hierfür sollte vereinfacht auf die mittleren Geländeneigungen der Senkeneinzugsgebiete zurückgegriffen werden, die sich GIS-gestützt leicht ermitteln lassen (Abbildung 5-12).



Geodatengrundlage: © LHS/LVGL (2016)

Abbildung 5-12: Neigungsklassen als rasterscharfe Berechnung (a) und als mittlere Neigung je Senkeneinzugsgebiet (b), Untersuchungsgebiet Saarbrücken (Schmitt und Scheid 2014)

Bei der Ausweisung eines Topografie-Zuschlags auf dieser Basis ist darauf zu achten, dass dieser die Bereiche mit besonders gefährdungsverschärfenden Eigenschaften betont und hervorhebt. Ebenso ist die Höhe des Zuschlags auf die Klassifizierung der Senken und Fließwege abzustimmen und ausgewogen zu wählen.

Für das Untersuchungsgebiet 1 zeigen konkrete Untersuchungen, dass ein Topografie-Zuschlag GT von +1 bei starker Neigung (N4) und +2 bei sehr starker Neigung (N5, N6) zu einer Überzeichnung dieses Einflussparameters führt. Ein pauschaler Topografie-Zuschlag von +1 auf die Fließweg- und Senkenklassen in Bereichen mit mindestens starker Neigung (ab Klasse N4) stellt jedoch eine angemessene Festlegung für dieses Beispielgebiet dar. Aufgrund der vergleichbaren Topografie gilt dies gleichermaßen für das Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied). Für das überwiegend schwach geneigte Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg) hat der Topografie-Zuschlag hingegen keine Relevanz.

5.2.3.3 Geländekrümmung

Die Geländekrümmung oder –wölbung (*curvature*) beschreibt die physischen Geländemerkmale eines Einzugsgebiets und dient in der Geomorphologie als wichtige Größe zur Beschreibung von Erosions- und Drainageprozessen. Sie lässt sich GIS-gestützt anhand des DGM ermitteln und wird über die Kombination aus Vertikalwölbung (in Gefällerrichtung) und Horizontalwölbung (senkrecht zur Gefällerrichtung) definiert und typisiert (Ad-hoc-AG Boden 2005). Eine besondere Relevanz für die Abflussbildung von Starkregenabflüssen hat vor allem die Krümmungskombination aus konvexer Vertikal- und konkaver Horizontalkrümmung (sog. Typ X,V, Abbildung 5-13 a), weil sich hierbei das akkumulierte Abflussvolumen mit einer Zunahme der Fließgeschwindigkeit kritisch bzw. maximal überlagert und räumlich konzentriert.

Entsprechende Krümmungsberechnungen und –auswertungen für das Untersuchungsgebiet Saarbrücken zeigen jedoch, dass die Implementierung rasterscharf berechneter Krümmungsverteilungen in die Gefährdungsklassifizierung nicht zielführend ist. Im urbanen Raum liegt aufgrund zahlreich vorhandener Gebäudebruchkanten, Stützwände, Einfriedungen etc. eine sehr hohe Krümmungsdiversität bei gleichzeitig hoher räumlicher Variabilität vor (Abbildung 5-13 b), die keine zufrieden stellenden Ergebnisse ermöglichen. Etwas günstigere Randbedingungen liegen bei natürlichen Außengebieten und größeren Hanglagen mit weitgehend natürlicher Prägung vor. Hier kann optional eine Gefährdungsverschärfung beispielsweise aufgrund eines Mindestanteils der kritischen Krümmungskombination (X,V) implementiert werden.

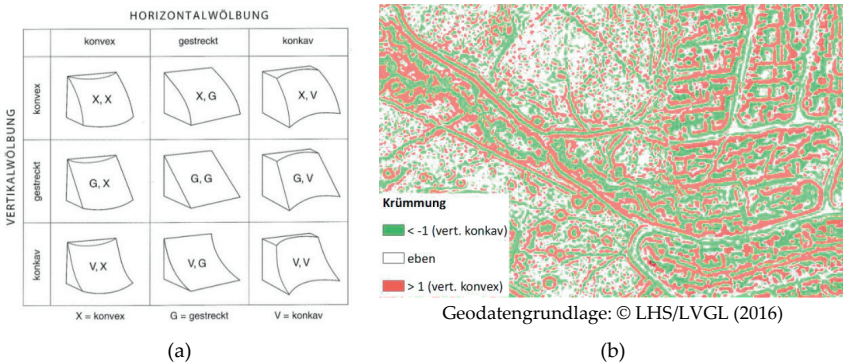


Abbildung 5-13: (a) Kennzeichnungsschema zur Krümmungsrichtung und –tendenz (Ad-hoc-AG Boden 2005) und (b) Krümmungsverteilungen im urbanen Raum, Beispiel Untersuchungsgebiet Saarbrücken (Schmitt und Scheid 2014)

5.2.3.4 Topografische Indices als Erosions- und Sedimentationsparameter

In der Geomorphologie werden aus dem Verhältnis von Einzugsgebietsgröße und Gefälle eines beliebigen Geländebezugspunktes Rückschlüsse auf das Erosions- und Sedimentationsverhalten unterschiedlicher Bereiche eines Untersuchungsgebiets gezogen. Ein üblicher Anwendungsfall ist dabei die Lokalisierung kleinräumiger, temporärer Erosionszonen (sog. "ephemeral gullies") (Moore et al. 1991). Die beiden primären Geländeattribute Einzugsgebietsgröße (*catchment area* oder *upslope contributing area*) A_s und Geländeneigung β oder S (*slope*) werden dabei nach unterschiedlichen Ansätzen zu verschiedenen Indices als sekundäre Geländeattribute kombiniert.

Mit dem **Stream Power Index** (SPI nach Wilson und Gallant 2000a bzw. Ω nach Moore und Burch 1986) wird in der Geomorphologie und digitalen Geländeanalyse die potenzielle Abtragskraft des Oberflächenabflusses und damit die Erosionsneigung des Geländes durch auftretenden Oberflächenabfluss abgeschätzt und quantifiziert. Dieser Aspekt ist grundsätzlich auch für Gefährdungslagen durch Sturzfluten in ländlichen Siedlungsbereichen mit hohem Außengebietseinfluss relevant.

Der **Compound Topographic Index** (Beven und Kirkby 1979; Moore et al. 1991) oder „topographic wetness index“ W (Wilson und Gallant 2000a) beschreibt, wie stark ein Gelände durch Oberflächenabflüsse hydromorphologisch geprägt ist und dient als topografische Kennzahl zur Lokalisierung von Vernässungsbereichen.

Daneben wird bei der digitalen Geländeanalyse häufig der **Topographic Position Index (TPI)** (Gallant und Wilson 2000; zitiert in Reu et al. 2013) verwendet. Dieser ermittelt den relativen Höhenunterschied eines Punktes zu seiner unmittelbaren Umgebung und liefert damit eine Markierung wechselnder Geländebeziehungen.

Im Rahmen der Arbeit wird untersucht, ob und wie sich diese Geländeattribute auf die topografischen Besonderheiten des urbanen Raums anwenden lassen und analysiert, ob damit ergänzende Informationen im Rahmen der topografischen Gefährdungsanalyse generiert werden können. Vorliegend werden kurz die Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammengefasst und bewertet. Einzelheiten zu den Untersuchungen sind in Anhang A-2 beschrieben.

Die Ergebnisse zeigen, dass die unmittelbare Anwendung sowohl des SPI als auch des CTI auf urbane Siedlungsräume problematisch ist. Ähnlich wie bei der Krümmungsbetrachtung treten auch hier sehr weite Wertespans auf, die eine zielführende methodische Berücksichtigung in der Zuordnung von Gefahrenklassen erschweren. Ursächlich hierfür sind die vielen, sich aus der Bebauungsstruktur ergebenden, un stetigen Oberflächenübergänge und Bruchkanten, die sehr hohe, kleinräumige Gefälle im DGM erzeugen und zu Extremwerten der Indices führen. Die beiden Indices SPI und CTI sollten daher bestenfalls außerhalb des Siedlungsraumes und gezielt zur hydrologischen Bewertung von Außeneinzugsgebieten angewendet werden, wo homogenere topografische Gegebenheiten vorliegen. Eine kategorische Implementierung in die Gefährdungsklassifizierung ist jedoch nicht zielführend.

Demgegenüber liefert der Topographic Position Index (TPI) auch für urbane Untersuchungsgebiete klare, verwertbare Ergebnisse. Größere, räumlich begrenzte Höhenänderungen, wie z. B. die Übergänge von Geländeterrassen oder Geländeeinschnitten entlang von Bahntrassen als „urbane Schluchten“ lassen sich sehr gut mit dem TPI markieren. In solchen Bereichen können bei Starkregenüberflutungen besondere Gefährdungslagen entstehen, weil sie beispielsweise als Abflusskorridore oder Tieflagen die Oberflächenabflüsse räumlich komprimieren und höhere Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten hervorrufen können.

Bezüglich einer Implementierung des TPI in die Methodik der Gefährdungsanalyse ist allerdings anzumerken, dass die TPI-markanten Bereiche sich weitgehend mit den bereits bekannten Gefahrenbereichen der Senken und Fließwege decken, sodass der zusätzliche Erkenntnisgewinn vergleichsweise gering ist. Dennoch ist es zu empfehlen, den TPI als ergänzende Informationsquelle in die Gefährdungsbetrachtungen einzubeziehen.

5.3 Überflutungsgefährdung im Bereich von Senken

Wie in Abschnitt 4.2.5 ausgeführt, bedarf es insbesondere bei der topografischen Gefährdungsanalyse einer differenzierten Bewertung der Überflutungsgefährdung, die von Senken ausgeht. Bei der hierzu durchgeführten Senkenklassifizierung ist zu entscheiden,

- welche Einzelparameter oder Parameterkombinationen zur Klassifizierung verwendet werden,
- über wie viele Einzelklassen die Gefahrenabstufung erfolgt und
- wie bzw. nach welchen Kriterien die Grenzen der Gefahrenklassen festgelegt werden.

Diese Aspekte werden nachfolgend näher erörtert und untersucht. Nach einer Erläuterung der zur Klassifizierung in Frage kommenden Senkenparameter folgen grundsätzliche Empfehlungen zur Festlegung der Klassenanzahl und –grenzwerte. Anschließend werden auf Grundlage einer umfassenden Variantenuntersuchung Anwendungsempfehlungen zur Gefahrenklassifizierung formuliert.

5.3.1 Senkenparameter zur Gefahrenklassifizierung

Nach erfolgter DOM-Vorglättung und Senkenselektion (Abschnitt 5.2.2) ist für die Anzahl an verbleibenden Senken die Gefahrenrelevanz anhand der Senkencharakteristik zu bewerten. Diese wird wesentlich von der räumlichen Ausdehnung und Geometrie geprägt. Die entsprechenden Parameter werden GIS-gestützt im Zuge der Vorglättung ermittelt (siehe Tabelle 5-5) und stehen als mögliche Klassifizierungsparameter der Überflutungsgefahr zur Verfügung. Da die Wertebereiche in der Regel

einer breiten Streuung unterliegen, sollte zunächst parameterweise das jeweilige Wertespektrum ausgewertet und der Effekt der Vorglättung ergänzend beurteilt werden. Entsprechende Angaben zu den Untersuchungsgebieten 1 bis 3 sind in Anhang A-3, Tabelle A-1 dokumentiert. Dabei sollten insbesondere die Extrema der Parameter einer Plausibilitätsprüfung durch Sichtung der generierten Senkenkarte unterzogen werden, beispielsweise für Senken mit sehr großer Tiefe (mehrere Meter) oder sehr großem Volumen (Tausende Kubikmeter).

Wichtig im Hinblick auf die Gefahrenklassifizierung ist auch, dass die geometrischen Senkenparameter nicht voneinander unabhängig sind, wie beispielhaft am Untersuchungsgebiet Saarbrücken dokumentiert ist (Abbildung 5-14). So besteht zwischen den beiden Senkenparametern Flächenausdehnung $A_{S,max}$ und Senkenvolumen $V_{S,max}$ eine enge Korrelation ($r_{xy} > 0,8$), wohingegen die maximale Senkentiefe $h_{S,max}$ als Extremum erwartungsgemäß nur mäßig ($r_{xy} < 0,5$) mit dem Senkenvolumen und gering mit der Flächenausdehnung (ohne Darstellung) korreliert. Die Einzugsgebietsfläche einer Senke verhält sich zu den anderen Senkenparametern statistisch unabhängig, was ebenfalls unmittelbar nachvollziehbar ist.

Tabelle 5-5: GIS-gestützt ermittelte Senkenparameter

Senkenparameter	Kürzel ⁶	Dim.	Beschreibung
maximale Senkentiefe	$h_{S,max}$ (<i>FillDepth</i>)	m, cm	auch: Fülltiefe; Abstand zwischen Senkentiefpunkt und maximaler Füllhöhe ($Z_{S,max} - Z_{S,min}$)
Höhenlage des Senkentiefpunkts	$Z_{S,min}$ (<i>BottomElev</i>)	m+NN	Punkt mit kleinstem Höhenwert innerhalb der Senke
Höhenlage des maximalen Senkenfüllstands	$Z_{S,max}$ (<i>FillElev</i>)	m+NN	Maximale Füllhöhe der Senke, gleichzeitig tiefster Punkt des Einzugsgebietsrands der Senke (pour point)
Flächenausdehnung der Senke	$A_{S,max}$ (<i>FillArea</i>)	m ²	Überflutungsfläche bei theoretisch maximaler Füllstandshöhe der Senke ($Z_{S,max}$)
Senkenvolumen	$V_{S,max}$ (<i>FillVolume</i>)	m ³	Volumen von tiefstem Punkt innerhalb der Senke bis zur maximalen Füllhöhe
Einzugsgebietsfläche	A_E (<i>DrainArea</i>)	m ²	Geometrische Gesamtfläche, die zum Senkentiefpunkt hin entwässert.
Undurchlässige Einzugsgebietsfläche	A_U	m ²	Über Abflussbeiwerte gewichtete Gesamtfläche, die zum Senkentiefpunkt hin entwässert. Produkt von Einzugsgebietsfläche A_E und dem Abflussbeiwert Ψ

⁶ Bezeichnungen in Klammer: Feldbezeichnungen der ArcGIS-Erweiterung ArcHydro. In diesem Kontext werden zudem die geometrischen Parameter der „Depressions“ gemäß ArcGIS-Terminologie verwendet.

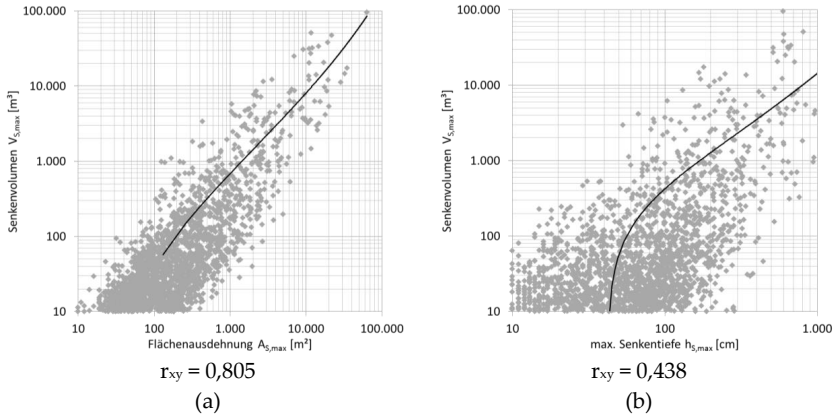


Abbildung 5-14: Korrelation zwischen (a) Flächenausdehnung bzw. (b) max. Senkentiefe und Senkenvolumen, Untersuchungsgebiet Saarbrücken (Beispiel z10002)

Die genannten geometrischen Senkenparameter sind in unterschiedlicher Weise geeignet, das Gefahrenpotenzial einer Senke zu beschreiben. In den nachfolgenden Abschnitten werden dieser Sachverhalt näher beleuchtet, darauf aufbauend mögliche Ansätze der Gefahrenklassifizierung skizziert und anhand des Untersuchungsgebiets Saarbrücken exemplarisch bewertet.

5.3.1.1 Maximale Senkentiefe

Die maximale Senkentiefe $h_{s,max}$ ist der Abstand in z-Richtung zwischen dem Senkentiefpunkt und dem tiefsten Randpunkt des Senkeneinzugsgebiets. Sie beschreibt die vertikale Ausdehnung der Senke. Allgemein wird davon ausgegangen, dass mit zunehmender Überflutungstiefe auch das Gefahrenpotenzial ansteigt, weshalb man bspw. auch bei der Bewertung von Flussgebietschhochwässern auf tiefenabhängige Schadensfunktionen für Gebäudeschäden zurück greift (DWA 2012). Dieser Zusammenhang gilt grundsätzlich auch in Bezug auf urbane Starkregenüberflutungen, wenngleich hier die meist geringere Amplitude der Wasserstände eine klare Differenzierung erschwert.

Es erscheint somit sachgerecht, die maximale Fülltiefe einer Senke in direkte Abhängigkeit zu deren Gefahrenpotenzial zu setzen: Mit zunehmender Überflutungstiefe treten sowohl längere Expositionsphasen als auch größere hydrostatische Druckwirkungen auf angrenzende Gebäude und Gebäudeelemente auf. Darüber hinaus gehen mit hohen Wasserständen häufig auch entsprechend große Überflutungsvolumina einher, die zu entsprechend höheren Schadensausprägungen bei Wassereintritt in Gebäude führen können. Auch bei Senken im Straßenraum nimmt die Gefährdung für Fahrzeuge oder Personen mit der Senkentiefe zu, beispielsweise weil ab ca. 50 cm Wassertiefe Fahrzeuge durch Versagen von Elektronik und Motor nicht

mehr zu manövrieren sind oder weil noch beherrschbare Wattiefen für Fußgänger überschritten sind. Ungeachtet dessen können jedoch auch aus geringen Wassertiefen signifikante Gefährdungen für angrenzende Gebäude in größerer Tiefenlage resultieren.

Einzelheiten zur Gefahrenklassifizierung anhand der Einstautiefe der Senken sind in Abschnitt 5.3.3.1 dokumentiert.

5.3.1.2 Senkenvolumen

Neben der maximalen Senkentiefe lässt auch das Senkenvolumen $V_{S,max}$ (Volumen bei maximaler Füllhöhe) gewisse Rückschlüsse auf das von einer Senke ausgehende Gefahrenpotenzial zu, weil das potenzielle Schadensausmaß von dem Überflutungsvolumen beeinflusst wird. Hinzu kommt, dass Schadensobjekte, die einem größeren Senkenvolumen ausgesetzt sind, entsprechend längere Expositionsphasen aufweisen können, da der Abbau der bestehenden Überflutungshöhe bei einem großen Volumen entsprechend langsamer erfolgt. Allerdings ist auch dieser Zusammenhang bei größeren Höhenunterschieden zwischen Senkentiefpunkt und angrenzender Bebauung zu relativieren.

Dennoch erscheint es sachgerecht, die von einer Senke ausgehende Überflutungsgefahr über das Senkenvolumen bei Vollfüllung zu klassifizieren und beispielsweise einem Schadensobjekt im Einwirkungsbereich einer großvolumigen Senke auch ein grundsätzlich höheres Gefährdungsausmaß zu unterstellen. Die Anwendung eines Klassifizierungsansatzes über das Senkenvolumen ist beispielhaft in Abschnitt 5.3.3.2 dokumentiert.

5.3.1.3 Flächenausdehnung einer Senke

Die Flächenausdehnung einer Senke $A_{S,max}$, oftmals verkürzt „Senkenfläche“ bezeichnet, korreliert eng mit dem maximalen Senkenvolumen (siehe Abbildung 5-14). Insofern lässt sich zwischen einer großen Senkenausdehnung und dem Gefahrenpotenzial einer Senke ebenfalls ein kausaler Zusammenhang unterstellen.

Die methodische Umsetzung dieses Parameters unterliegt bei einer GIS-gestützten Gefährdungsanalyse jedoch gewissen Besonderheiten: Im Gegensatz zur Tiefe oder dem Volumen einer Senke wird die flächige Ausdehnung unmittelbar bei der GIS-gestützten Gefährdungsanalyse visualisiert. Ihr Ausmaß muss daher nicht gesondert als Bewertungskriterium der Überflutungsgefahr verarbeitet werden, es ergibt sich unmittelbar aus der Kartendarstellung. Hinzu kommt, dass weitläufig ausgedehnte Senken einer stärkeren Differenzierung in verschiedene „Aktivierungszonen“ und Tiefenbereiche bedürfen, weil diese unterschiedlich häufig geflutet werden. Dieser Umstand sollte methodisch gesondert bei der Gefahrenklassifizierung berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 5.3.3).

Im Vergleich zu den anderen geometrischen Senkenparametern ist die maximale Senkenausdehnung weniger gut zur Gefahrenklassifizierung geeignet als die maximale Senkentiefe oder das Senkenvolumen, zumal sich über die enge Korrelation mit $V_{S,max}$ auch eine ähnliche Gefahrenklassifizierung ergeben würde.

5.3.1.4 Einzugsgebietsfläche der Senke

Die Einzugsgebietsfläche A_E einer Senke wird bei der GIS-gestützten topografischen Analyse als eigene Information (shape bzw. feature class) erzeugt und bestimmt die Größenordnung des durch Starkregen verursachten Oberflächenabflussvolumens, der der Senke zuströmt. Sie weist als sekundärer Senkenparameter keinen Bezug zur Senkengeometrie auf und sollte daher weder als Auswahlkriterium der Senken (Abschnitt 5.2.2) noch als alleinstehendes Bewertungskriterium für das Gefahrenpotenzial einer Senke verwendet werden. In Kombination mit dem maximalen Senkenvolumen ist sie jedoch eine wichtige Kenngröße, um die Eintrittshäufigkeit einer Überflutungsgefahr qualitativ zu klassifizieren (siehe Abschnitt 5.3.1.5). Je nach Fragestellung der Überflutungsabschätzung kann es wichtig sein, die Abflusswirksamkeit des Einzugsgebiets über den Ansatz pauschaler Abflussbeiwerte zu berücksichtigen. Diese lässt sich GIS-gestützt auf einfache Art über die Implementierung eines Wichtungsrasters mit Abflussbeiwerten in die Fließwegakkumulation erzeugen (siehe Abschnitt 4.2.4).

5.3.1.5 Retentionshöhe

Wie in Abschnitt 4.2.1 dargelegt, definiert sich die Überflutungsgefahr neben dem räumlich-zeitlichen Ausmaß des Niederschlagsabflusses auch über dessen Eintrittshäufigkeit. Insofern sollten sich diese beiden Aspekte auch bei der Gefährdungsbewertung im Bereich der Senken wiederfinden. Während das potenzielle Überflutungsmaß vorrangig über die geometrischen Senkenparameter (Tiefe und Füllvolumen) beschreibbar ist, kann die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Senkenfüllung über das spezifische Retentionsvolumen einer Senke (Dimension m^3/ha) abgeschätzt werden (vgl. DWA 2016).

Scheid et al. (2013) empfehlen hierzu alternativ, den Quotienten aus maximalem Senkenvolumen $V_{S,max}$ und der undurchlässigen Fläche des Senkeneinzugsgebiets A_U nicht als flächenbezogenes Volumen anzugeben, sondern bewusst als Längeneinheit in [mm] und definieren die Retentionshöhe h_{Ret} einer Senke nach Gleichung (6)

$$h_{Ret,i} = \frac{V_{S,i,max}}{A_{U,i}} \cdot 10^3 \quad \text{mm} \quad (6)$$

mit: $h_{Ret,i}$ = Retentionshöhe der Senke i [mm]
 $V_{S,i,max}$ = max. Vollfüllungsvolumen der Senke i [m^3]
 $A_{U,i}$ = undurchlässige Einzugsgebietsfläche der Senke i [m^2] gemäß Tabelle 5-5

Die Verwendung der Retentionshöhe in [mm] bietet den Vorteil, dass damit - im Rahmen der getroffenen Vereinfachungen zur Abflussbildung - unmittelbar die Mindestniederschlagshöhe eines Starkregenereignisses ersichtlich wird, die zu einer Vollfüllung der Senke führt bzw. ab der von einem Überlaufen der Senke auszugehen ist. Auch wenn Senken grundsätzlich als Gefahrenbereiche für Überflutungen angesehen werden, wird mit der neutralen Begriffsverwendung „Retention“ bewusst zum Ausdruck gebracht, dass die Retentionshöhe auch als zuverlässiges Bewertungskriterium für eine etwaige, unschädliche Zwischenspeicherung von Oberflächenwasser bei Starkregenüberflutungen herangezogen werden und als Planungsgröße für Flächenmitbenutzungsmaßnahmen und urbane Retentionsräume dienen kann.

In diesem Zusammenhang gilt es auch zu beachten, dass die Retentionshöhen aller Senken eines urbanen Betrachtungsgebiets in der Regel in einem sehr breiten Wertespektrum streuen (siehe Anhang A-3, Tabelle A-1) und es zudem niederschlagsbedingt eine praxisrelevante Obergrenze der Retentionshöhe gibt. Senken mit einem sehr hohen h_{Ret} -Wert erreichen mit großer Wahrscheinlichkeit nie ihre vollständige räumliche Ausdehnung über $A_{S,max}$, weil dann einem sehr großen Retentionsvolumen ein verhältnismäßig kleines Einzugsgebiet gegenüber steht. Diese Konstellation ist z. B. häufig bei Innenhöfen in geschlossener Blockbebauung anzutreffen. Einzelheiten zur Festlegung dieser Obergrenze finden sich in Abschnitt 5.3.3.3.

Mit der belastungsunabhängigen, pauschalen Quantifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Senkenfüllung bei Starkregen ermöglicht die Retentionshöhe h_{Ret} auch einen relativen Vergleich der Senken untereinander hinsichtlich ihrer Überflutungsgefahr. Sie sollte daher als wichtiges und geeignetes Kriterium für die Bewertung der Überflutungsgefahr im Bereich von Senken (mit)verwendet werden. Untersuchungen zur Klassifizierung anhand der Retentionshöhe sind für das Untersuchungsgebiet Saarbrücken in Abschnitt 5.3.3.3 dokumentiert.

5.3.2 Klassenanzahl und Klassengrenzen

Die Festlegung des über die Klassenanzahl dargestellten Differenzierungsgrads muss in Abwägung unterschiedlicher Ziele getroffen werden. Da die zur Klassifizierung herangezogenen Senkenparameter in der Regel eine breite Wertestreuung aufweisen, bedarf es einerseits einer angemessenen Klassenzahl, die vergleichbare Gefahren- bzw. Gefährdungsausmaße innerhalb der Klassen möglichst sachgerecht abbildet. Andererseits bedarf es einer einfachen Gefahrenabstufung, die klar nachvollziehbar und sprachlich einprägsam ist, und die sich vor allem an den methodisch bedingten Aussagegrenzen orientiert und Scheingenauigkeiten vermeidet. Vor diesem Hintergrund ist eine Differenzierung in drei bis fünf Gefahrenklassen, sprachlich ausgedrückt von „(sehr) gering“ bis „(sehr) hoch“, ein sachgerechter Kompromiss zwischen den beiden Zielsetzungen. Die Erkenntnis, dass Starkregenüberflutungen grundsätzlich überall auftreten und Überflutungsgefahren nie kategorisch ausge-

geschlossen werden können, sollte bei der Beschreibung der untersten Gefahrenklasse entsprechend sprachlich ausgedrückt werden (z. B. „sehr geringe Gefahr“ oder „geringe Gefahr“ statt „keine Gefahr“).

Die Einteilung eines kontinuierlich verteilten Wertespektrums, wie Senkentiefen oder –volumina, in diskrete Klassen stellt grundsätzlich eine methodische Vereinfachung dar. Insofern ist die mit der Festlegung der Anzahl an Gefahrenklassen verbundene Definition der Klassengrenzen schwierig und mit Ungenauigkeiten verbunden. Es fehlen in der Regel belastbare, charakteristische Grenzwerte, mit denen sich der Übergang in eine tiefere oder höhere Gefahrenklasse sachlich begründen und die real vorhandenen, unterschiedlichen Gefahrenausprägungen quantifizieren lassen, beispielsweise wie eine Senke „mittlerer Größe“ und darauf aufbauend ein „mittleres Gefahrenausmaß“ wertemäßig zu definieren sind.

In Ermangelung dessen wird empfohlen, die Klassifizierung eines Parameters anhand einer Häufigkeitsverteilung seines Wertespektrums zu überprüfen, wie in Abbildung 5-15 beispielhaft für das Senkenvolumen dargestellt. So kann zumindest bewertet werden, ob die definierten Klassengrenzen zu ausgewogenen Klassenbreiten und -häufigkeiten führen. Ebenso lassen sich damit statistische Auffälligkeiten (unter- und überrepräsentierte Wertebereiche) erkennen und bei der Klassifizierung berücksichtigen.

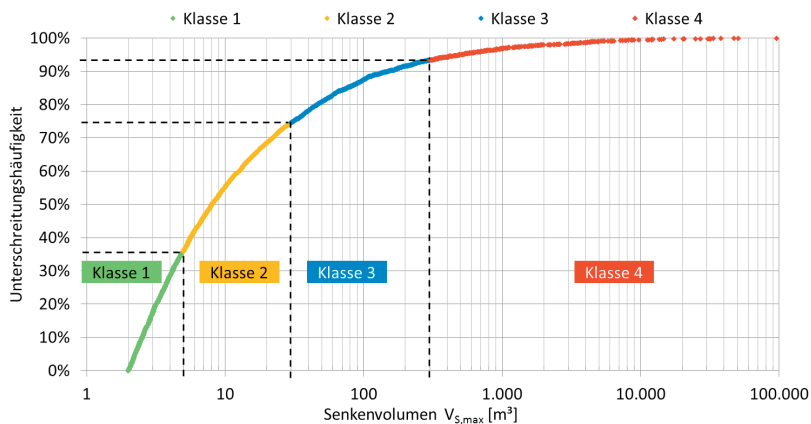


Abbildung 5-15: Kumulierte Häufigkeitsverteilung (Unterschreitungshäufigkeiten) der Senkenvolumina $V_{S,max}$, Untersuchungsgebiet Saarbrücken (Beispiel z10002)

5.3.3 Variantenuntersuchungen zur Gefahrenklassifizierung im Bereich von Senken

Die Auswahl und Anzahl der zur Klassifizierung verwendeten Senkenparameter hängt davon ab, in welchem Maße die einzelnen Gefahrenkomponenten, konkret das Gefahrenausmaß und die Eintrittswahrscheinlichkeit, über die jeweiligen Senkenparameter abgebildet werden können. Ob idealerweise ein einzelner Klassifizierungsparameter hinreichend diesem Anspruch gerecht wird, oder ob wenige Parameter in Kombination zur Klassifizierung heranzuziehen sind, wird nachfolgend näher untersucht.

Aufbauend auf den Bewertungen der verschiedenen Senkenparameter zur Beschreibung von Überflutungsgefahren und den genannten Klassifizierungsgrundsätzen werden nachfolgend unterschiedliche Ansätze der Gefahrenklassifizierung im Bereich von Senken beschrieben und anhand des Untersuchungsgebiets 1 (Saarbrücken) miteinander verglichen. Die sieben in Tabelle 5-6 gelisteten Varianten stellen eine exemplarische Auswahl dar und verarbeiten je nach Ansatz einen oder mehrere unterschiedliche Klassifizierungsparameter. Ferner wird bei einigen Varianten eine zusätzliche Unterteilung der Senkenausdehnung in unterschiedliche Gefahrenzonen vorgenommen, nachfolgend vereinfacht als **Senkenzonierung** bezeichnet. Diese ermöglicht eine stärkere räumliche Differenzierung der Gefahreninformation.

Tabelle 5-6: Variantenübersicht zur Gefahrenklassifizierung von Senken

Klassifizierungsparameter	ohne Zonierung	mit Zonierung
Senken- bzw. Einstautiefe	T0	T1
Senken- bzw. Einstauvolumen	V0	---
Retentionshöhe	R0	R1
Senkengröße (Senkentiefe und -volumen)	TV0	---
Senkengröße und Retentionshöhe	---	TVR1

5.3.3.1 Klassifizierung anhand der Einstautiefe (Varianten T0 und T1)

Die Gefahrenklassifizierung **anhand der Einstautiefe einer Senke** unterstellt einen grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Wassertiefe und Ausmaß der Überflutungsgefahr (vgl. Abschnitt 5.3.1.1). Dies lässt sich, zumindest in groben Ansätzen, auch anhand sachlicher Kriterien begründen. Hierzu zählen charakteristische Höhenwerte der Bebauung im urbanen Raum (z. B. Bordsteinhöhen, Lichtschachtoberkanten, Unterkanten von Fensteröffnungen).

Die Klassifizierung lässt sich sowohl pauschal anhand der maximalen Senkentiefe $h_{s,max}$ als auch differenziert nach verschiedenen Tiefenzonen einer Senke umsetzen. Beide Ansätze werden als **Varianten T0 und T1** auf das Untersuchungsgebiet Saar-

brücken angewendet und ausgewertet. Hierbei wurden exemplarisch die in Tabelle 5-7 aufgelisteten Wasserstände bzw. Tiefenzonen der Senken zur Klassifizierung angesetzt.

Gegenüber der pauschalen Klassifizierung nach Variante T0 ergibt sich bei Variante T1 nur im Bereich des Senkentiefpunkts jeweils die gleiche Gefahreneinstufung. In den Randbereichen einer Senke ist die Gefahrenklasse geringer, da diese Senkenbereiche nur bei maximalem Einstau und damit seltener überflutet werden.

Der Klassifizierungsansatz T1 entspricht im Wesentlichen den beispielhaften Empfehlungen des Merkblatts DWA-M 119 (DWA 2016), bei dem die unterschiedlichen Gefahrenklassen in Abhängigkeit von berechneten Wasserständen ausgewiesen werden. Das Merkblatt empfiehlt diese Art der Klassifizierung vorrangig für belastungsabhängige Bewertungsmethoden. Für eine belastungsunabhängige Gefahrenbewertung lässt sie sich nur als qualitative Größe heranziehen. Die Klassifizierung der vorgestellten Varianten T0 und T1 ist gegenüber der Empfehlung in DWA-M 119 um eine fünfte Gefahrenklasse ergänzt (siehe Tabelle 5-7), woraus sich auch eine Verschiebung in der Terminologie der Gefahrenklassen ergibt. Der Beginn der Klassennummerierung mit Gefahrenklasse GS = 0 („sehr gering“) bietet diverse Vorteile bei der numerischen Weiterverarbeitung, zumal Klasse 0 auch für senkenferne Bereiche gilt, für die nur eine „grundsätzliche“, theoretisch vorhandene Überflutungsgefahr existiert.

Tabelle 5-7: Gefahrenklassifizierung von Senken anhand der Senken- bzw. Einstautiefe (Varianten T0 und T1)

Gefahrenklasse GS	Beschreibung Überflutungsgefahr	Senken- bzw. Einstautiefe	Gefahrenklasse DWA-M119 ^{*)}
0	sehr gering	< 10 cm	1 (gering)
1	gering	≥ 10 cm bis < 30 cm	2 (mäßig)
2	mäßig	≥ 30 cm bis < 50 cm	3 (hoch)
3	hoch	≥ 50 cm bis < 100 cm	4 (sehr hoch)
4	sehr hoch	≥ 100 cm	nicht definiert

^{*)} gemäß DWA-M 119, Tab. 4 (DWA 2016)

5.3.3.2 Klassifizierung anhand des Einstauvolumens (Variante V0)

Der Klassifizierungsansatz nach **Variante V0** legt die Gefahrenklasse einer Senke anhand ihres **maximalen Senkenvolumens** $V_{S,max}$ fest. Tabelle 5-8 dokumentiert die in Variante V0 exemplarisch getroffene Zuordnung von $V_{S,max}$ zu den Gefahrenklassen GS.

Eine Zonierung der Senken über definierte Teileinstauvolumina ist als Variante ebenfalls denkbar, führt jedoch zu den beschriebenen Schwierigkeiten einer sachlich begründeten Festlegung der Volumenabstufung. Da zudem ein klarer Höhenbezug in der Gefahrenkarte fehlt, ist eine solche Variante weniger geeignet als eine Höhenzonierung nach Variante T1 und wird daher hier nicht weiter untersucht.

Tabelle 5-8: Gefahrenklassifizierung von Senken anhand des Senkenvolumens (Variante V0)

Gefahrenklasse GS	Beschreibung	max. Senkenvolumen $V_{S,max}$
0	sehr gering	< 2 m ³
1	gering	≥ 2 m ³ bis < 5 m ³
2	mäßig	≥ 5 m ³ bis < 30 m ³
3	hoch	≥ 30 m ³ bis < 300 m ³
4	sehr hoch	≥ 300 m ³

5.3.3.3 Klassifizierung anhand der Retentionshöhe (Varianten R0 und R1)

Die **Varianten R0 und R1** klassifizieren das Gefahrenausmaß im Bereich der Senken anhand der **Retentionshöhe** h_{Ret} . Diese nimmt Bezug auf die abflusswirksame Einzugsgebietsfläche und implementiert die Wahrscheinlichkeit, dass eine Senke vollständig geflutet und als Gefahrenzone aktiviert wird, in die Gefahrenklassifizierung. Allgemein gilt, dass die Überflutungsgefahr einer Senke (zumindest in ihrer maximalen Ausdehnung) mit zunehmender Retentionshöhe abnimmt (siehe Abschnitt 5.3.1.5). Während sich Variante R0 auf die Retentionshöhe der Senke bei Vollfüllung ($V_{S,max}$) bezieht, wird bei Variante R1 anhand der definierter Klassenwerte eine zonale Abstufung der Gefahrenbereiche vorgenommen. Diese liegen für das Untersuchungsgebiet 1 zwischen $h_{Ret} = 2$ mm und $h_{Ret} = 300$ mm (Tabelle 5-9) und sind das Resultat der Auswertung der Häufigkeitsverteilung gemäß Abbildung 5-16.

Tabelle 5-9: Gefahrenklassifizierung von Senken anhand der Retentionshöhe (Varianten R0 und R1)

Gefahrenklasse GS	Beschreibung	Retentionshöhe h_{Ret}
0	sehr gering	≥ 300 mm (bzw. PEN)
1	gering	≥ 40 mm bis < 300 mm
2	mäßig	≥ 10 mm bis < 40 mm
3	hoch	≥ 2 mm bis < 10 mm
4	sehr hoch	< 2 mm

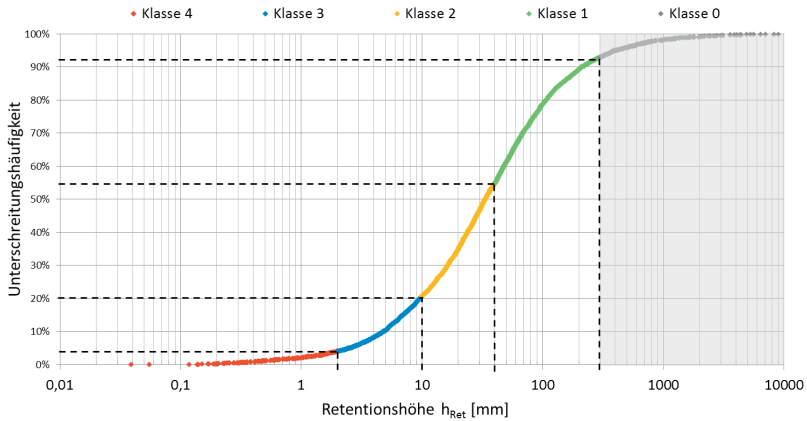


Abbildung 5-16: Kumulierte Häufigkeitsverteilung (Unterschreitungshäufigkeiten) der Senkenretentionshöhen h_{Ret} , Untersuchungsgebiet 1 (Beispiel z10002)

Es sollte sinnvollerweise eine Obergrenze der Retentionshöhe in die Klassifizierung einbezogen werden, weil auch für die Extremität eines Starkregenereignisses eine physikalisch bedingte Obergrenze existiert, die sich aus der Limitation des atmosphärisch transportierbaren Wasserdampfgehalts ergibt, der für ein Regenereignis ursächlich ist. Die hierfür in der Hydrologie relevanten Niederschlagsgrößen sind die „regionalisierte maximierte Gebietsniederschlagshöhe (MGN)“ sowie der „praxisrelevante Extremwert des Niederschlags (PEN)“.

Die MGN wird über ein physikalisch-empirisches Abschätzungsverfahren ermittelt (Schmidt 1997) und ist als „eine mögliche, bis auf weiteres akzeptable Quantifizierung der vermutlich größten Gebietsniederschläge flächendeckend für Deutschland anzusehen“ (Stalman et al. 2004). Sie ist somit als regionalisierter oberer Grenzwert einer Gebietsniederschlagshöhe anzusehen, die „nach menschlichem Ermessen“ nicht erreicht wird.

Die „praxisrelevanten Extremwerte des Niederschlags (PEN)“ beruhen auf einer Extrapolation der KOSTRA-DWD-Niederschlagsdaten für die Wiederkehrzeiten $T_n = 1.000$ a und $T_n = 10.000$ a, die in mehreren Phasen entwickelt, fortgeschrieben und aktualisiert wurden (Verworn und Kummer 2003, 2006; Verworn und Draschoff 2008). PEN-Werte sind für unterschiedliche Dauerstufen von 15 min bis 72 h verfügbar. Sie liegen definitionsgemäß unterhalb der MGN-Werte und sollten für den vorliegenden Anwendungsfall bevorzugt verwendet werden, zumal sie als Softwareprodukt für die Ingenieurpraxis (LAWA 2010a) einfach verfügbar sind.

Bei Ansatz von PEN-Werten zur Festlegung der h_{Ret} -Obergrenze sollten durchaus auch Zuschläge in Betracht gezogen werden, um etwaige, für die Zukunft prognostizierte Zunahmen extremer Niederschlagsereignisse entsprechend zu würdigen. Vor-

liegend wurde für das Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken) ein PEN-Wert von 280 mm ermittelt (Schmitt und Scheid 2014) und die h_{Ret} -Obergrenze auf 300 mm festgelegt.

5.3.3.4 Klassifizierung anhand der Senkengröße (Variante TV0)

Gegenüber den vorgenannten Ansätzen lässt sich die Überflutungsgefahr auch anhand einer Kombination mehrerer, sich ergänzender Einzelparameter bestimmen. Damit soll eine bessere Absicherung und höhere Zuverlässigkeit der Klassifizierung erzielt werden. Wie dargelegt, können sowohl die maximale Senkentiefe $h_{S,max}$ (Abschnitt 5.3.1.1) als auch das maximale Senkenvolumen $V_{S,max}$ (Abschnitt 5.3.1.2) grundsätzlich als Indizien für die Senkengröße und der damit verbundenen Überflutungsgefahr verwendet werden. Es zeigt sich aber auch, dass beide geometrischen Parameter nur mäßig korrelieren (vgl. Abbildung 5-14 rechts) und Fehleinschätzungen der Senkengröße möglich sind (z. B. großes Volumen trotz kleiner Senkentiefe und umgekehrt).

Aus diesem Grund werden bei dem Klassifizierungsansatz nach **Variante TV0** diese beiden Senkenparameter ($h_{S,max}$ und $V_{S,max}$) zur Beschreibung der „**Senkengröße**“ kombiniert und damit die Gefahrenklassifizierung definiert. Tabelle 5-10 dokumentiert die in Variante TV0 exemplarisch für das Untersuchungsgebiet 1 getroffene Zuordnung der beiden Parameter $h_{S,max}$ und $V_{S,max}$ zur Gefahrenklasse GS. Dabei bleiben die Klassengrenzen der Einzelparameter unverändert. Mit dieser Zuordnung werden die Senkengröße und damit das Gefahrenpotenzial abgestuft, wenn einer der beiden Einzelparameter nur gering oder mäßig ausgeprägt ist. Aufgrund der Parameterkombination erübrigt sich bei dieser Variante auch eine Zonierung der Senken.

Tabelle 5-10: Gefahrenklassifizierung anhand der Senkengröße (Variante TV0)

Gefahrenklasse GS		Senkenvolumen $V_{S,max}$			
		$\geq 2 \text{ m}^3 \text{ bis } < 5 \text{ m}^3$	$\geq 5 \text{ m}^3 \text{ bis } < 30 \text{ m}^3$	$\geq 30 \text{ m}^3 \text{ bis } < 300 \text{ m}^3$	$\geq 300 \text{ m}^3$
Senkentiefe $h_{S,max}$	$\geq 10 \text{ cm bis } < 30 \text{ cm}$	1 - gering	2 - mäßig	2 - mäßig	3 - hoch
	$\geq 30 \text{ cm bis } < 50 \text{ cm}$	2 - mäßig	2 - mäßig	3 - hoch	3 - hoch
	$\geq 50 \text{ cm bis } < 100 \text{ cm}$	2 - mäßig	3 - hoch	3 - hoch	4 - sehr hoch
	$\geq 100 \text{ cm}$	3 - hoch	3 - hoch	4 - sehr hoch	4 - sehr hoch
Hinweis: Für $h_{S,max} < 10 \text{ cm}$ oder $V_{S,max} < 2 \text{ m}^3$ gilt: GS = 0 (sehr gering)					

5.3.3.5 Klassifizierung anhand der h_{Ret} -Zonen und der Senkengröße (Variante TVR1)

Dieser Klassifizierungsansatz stellt eine Weiterentwicklung der Variante R1 dar, indem zusätzlich die Senkengröße nach Variante TV0 berücksichtigt wird. Während die Klassifizierung über h_{Ret} -Zonen (Variante R1) vorrangig auf die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Überflutungsgefahr abzielt, drückt die Klassifizierung anhand der Senkengröße (Variante TV0) vor allem die räumlich-zeitliche Gefahrenausrprägung aus. Mit Variante TVR1 sollen beide Gefahrenaspekte kombiniert bewertet werden. In der konkreten Umsetzung wird die höchste Gefahrenklasse dann einer Senke zugewiesen, wenn diese nach beiden Kriterien (h_{Ret} und Senkengröße) mit „sehr hoch“ einzustufen ist, wenn also ein vollständiger Senkeneinstau vergleichsweise häufig mit einem hohen Volumen und hohen Wasserständen eintritt. Umgekehrt wird das Gefahrenaussmaß bei kleinen bzw. flachen Senken auch dann reduziert, wenn dieses geringe Volumen aufgrund der geringen Retentionshöhe häufiger aktiviert wird.

Tabelle 5-11: Abzüge auf die h_{Ret} -bezogene Gefahrenklassifizierung von Senken anhand der Senkengröße (Variante TVR1)

Abzug auf GS gemäß R1 (h_{Ret})		Senkenvolumen $V_{S,max}$			
		$\geq 2 \text{ m}^3$ bis $< 5 \text{ m}^3$	$\geq 5 \text{ m}^3$ bis $< 30 \text{ m}^3$	$\geq 30 \text{ m}^3$ bis $< 300 \text{ m}^3$	$\geq 300 \text{ m}^3$
Senkentiefe $h_{S,max}$	$\geq 10 \text{ cm}$ bis $< 30 \text{ cm}$	-3	-2	-2	-1
	$\geq 30 \text{ cm}$ bis $< 50 \text{ cm}$	-2	-2	-1	-1
	$\geq 50 \text{ cm}$ bis $< 100 \text{ cm}$	-2	-1	-1	0
	$\geq 100 \text{ cm}$	-1	-1	0	0

Ferner gilt bei $h_{S,max} < 10 \text{ cm}$ oder $V_{S,max} < 2 \text{ m}^3$ (= „sehr geringe“ Senkengröße): Abzug auf GS: -4

Methodisch lässt sich dies einfach durch entsprechende Abschläge für die Senkengröße (siehe Tabelle 5-11) umsetzen, die auf die über h_{Ret} zugewiesene Gefahrenklasse nach Tabelle 5-9 angerechnet werden. Dieser Ansatz gewährleistet zudem die methodische Konsistenz hinsichtlich der DGM-Vorglättung bzw. Senkenselektion (siehe Abschnitt 5.2.2), da sich damit begründen lässt, warum kleinste Senken trotz einer geringen Retentionshöhe als nicht relevant eingestuft und aufgefüllt werden.

5.3.3.6 Variantenvergleich und Fazit

Die Anwendung der beschriebenen Klassifizierungsvarianten auf das Untersuchungsgebiet 1 liefert die in Abbildung 5-17 dargestellten Gesamtflächen als Anzahl der Rasterfelder der Gefahrenklassen⁷.

Abbildung 5-18 dokumentiert ergänzend für jede Variante die Anzahl der exponierten Gebäude und deren Verteilung auf die verschiedenen Gefährdungsklassen. Ergänzende Dokumentationen zur Auswertung der Gefahren- bzw. Gefährdungsklassen finden sich in Anhang A-4.

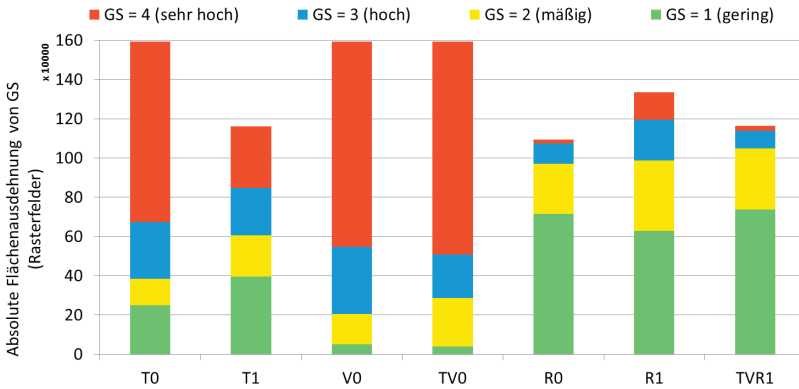


Abbildung 5-17: Absolute Flächen der Gefahrenklassen der Senken (GS) je Klassifizierungsvariante bei Vorglättung z10002, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

⁷ Die bilanzierten Flächenanteile beziehen sich auf die Summe aller bewertungsrelevanten Senken des Untersuchungsgebiets 1 für Glättungsvariante z10002 (4.375 Senken, ohne Innenhöfe oder Oberflächengewässer).

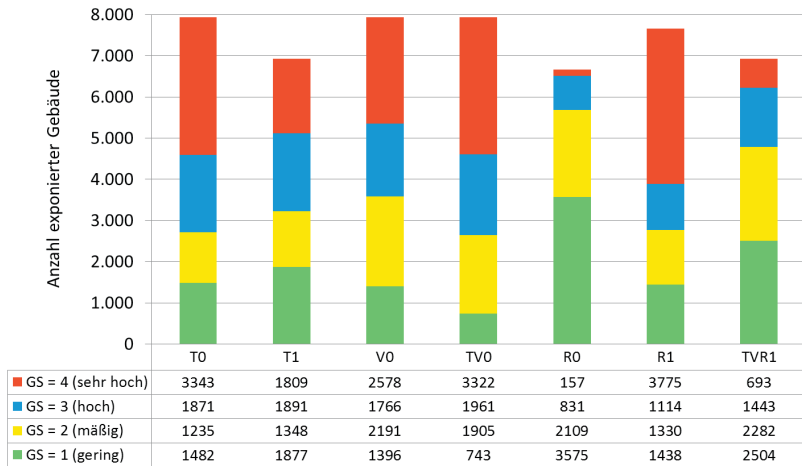


Abbildung 5-18: Anzahl exponierter Gebäude je Klassifizierungsvariante und Gefährdungskategorie bei Vorglättung z10002, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

Beide Auswertungen führen zu den nachfolgenden Erkenntnissen und Schlussfolgerungen

... bezüglich der Auswirkungen einer Senkenzonierung:

- Die Senkenzonierung ergibt im Vergleich eine Reduktion der „Gefahrenfläche“, indem Anteile von GS = 0 (sehr gering) enthalten sind, die entweder unterhalb der Signifikanzschwellenwerte der Senkenselektion (Variante T1) liegen (z. B. flache Senkenrandzonen < 10 cm) oder, wie bei den Varianten R1 und TVR1, oberhalb der PEN-Schwelle.
- Varianten ohne Zonierung (T0, V0, VR0) weisen erhebliche Flächenanteile in der höchsten Gefahrenklasse GS = 4 auf und überschätzen damit das Gefahrenpotenzial, weil der Maximalwert der Klassifizierung jeweils unmittelbar für die maximale Senkenausdehnung gilt. Hierbei kommt auch zum Tragen, dass tiefe bzw. großvolumige Senken mit großen Senkenausdehnungen korrelieren (siehe Abbildung 5-14).

Bei Variante R0 wirkt der Zonierungseffekt gegenteilig: Hier werden die Flächenanteile mit sehr hohem Gefahrenpotenzial unterschätzt, weil die Retentionshöhen der Senken allein über das vorhandene Gesamtvolumen kategorisiert werden und die am häufigsten aktivierten Bereiche nahe des Senkentieftpunkts dann nicht gesondert mit GS = 4 ausgewiesen sind.

- Insgesamt gilt, dass eine Zonierung grundsätzlich ein differenzierteres und zugleich realitätsnäheres Informationsbild zur Gefahrensituation im Bereich von Senken liefert. Bei den Varianten T1 und R1 erscheint die Klassenaufteilung vergleichsweise ausgewogen.

... bezüglich der Auswahl und Eignung der Klassifizierungsparameter:

- Wird die Überflutungstiefe als Gefahrenkriterium einer Senke herangezogen, ist obligatorisch eine Tiefenzonierung vorzunehmen (Variante T1). Eine einheitliche Klassifizierung der Senken auf Grundlage der maximalen Senkentiefe $h_{S,max}$ ist weder sachgerecht noch konsequent. Insofern ist von Variante T0 abzuraten, weil systematisch große Senkenbereiche überschätzt werden (siehe Abbildung 5-17).
- Bei einer Gefahrenklassifizierung über das Senkenvolumen (Variante V0) bzw. die Senkengröße (Variante TV0) ergeben sich ausgeprägte Gefahrenanteile (Klasse GS = 4), i. W. aufgrund der fehlenden Zonierung (s.o.). Diese Verteilung findet sich nur leicht abgeschwächt auch in der Expositionsverteilung wieder. Somit ist auch bezüglich der Gebäudegefährdung eine methodische Überschätzung erkennbar: Beispielsweise für Objekte am Rand einer Senke abseits des Tiefpunkts kommt das große Gesamtüberflutungsvolumen meist nicht zum Tragen, weil nur ein selten auftretender Volumenanteil für das Gebäude eine Gefährdung darstellen würde. Die Kombination von Volumen und Tiefe zur „Senkengröße“ bewirkt eine geringfügig verschärfte Verteilung der Gefahrenklassen sowohl bei den Flächenanteilen als auch der Gebäudeexposition.
- Die Senkenklassifizierung über die Retentionshöhe (Varianten R0 und R1) erzeugt vergleichsweise schwach ausgeprägte Gefahrenverteilungen. Allerdings liefert Variante R1 die größte Anzahl an Gebäuden mit „sehr hoher“ Gefährdung, weil die kategorisch mit GS = 4 klassifizierten Senkentiefpunkte oftmals unmittelbar an die Gebäude angrenzen, auch wenn diese Bereiche oftmals nur sehr geringe Ausdehnungen (wenige Quadratmeter) haben und entsprechend geringe Einstauvolumina bedeuten. Dabei stellt sich auch die Frage nach der Signifikanz und Datengenauigkeit des zugrunde liegenden Oberflächenmodells (DOM), da sich insbesondere in Gebäudenähe Unschärfen aus der DGM-Interpolation ergeben, die die Ergebnisgüte beeinträchtigen (siehe Abschnitt 5.2.1). Insofern muss für diese Bereiche von einer methodisch bedingten Gefährdungsüberschätzung ausgegangen werden, die gerade bei einer zurückhaltenden Vorglättung und Senkenauswahl mit kleinen Zahlenwerten der Glättungsparameter besonders ausgeprägt ist. Im Vergleich dazu bewirkt die zusätzliche Abminderung über die Senkengröße (Variante TVR1) eine deutliche Vergleichmäßigung der Gefahrenklassenanteile. Dies erscheint auch sachgerechter, da geringe Überflutungsvolumina, auch wenn sie häufiger eintreten, mit entsprechend geringerem Gefährdungspotenzial einzustufen sind.
- Insgesamt zeigt der Quervergleich der Varianten, dass eine sinnvolle Kombination mehrerer Senkenparameter besser geeignet ist, die Überflutungsgefahr im Bereich von Senken mit ihren Ausprägungen abzubilden. Damit sind ausgewogenere Klassifizierungen möglich als unter Ansatz eines Einzelparameters.

Allgemein bleibt festzuhalten, dass es augenscheinlich deutliche Unterschiede zwischen den Variantenergebnissen gibt. Die ausgewiesenen Flächenanteile mit einer „sehr hohen“ Überflutungsgefahr erstrecken sich von nur knapp 2 % (R0, TVR1) bis nahezu 70 % (TV0). Entsprechend stark differieren in umgekehrter Ausprägung die Flächenanteile für eine „geringe“ Überflutungsgefahr (GS = 1). Die Untersuchung bestätigt, dass das Gesamtbild der Überflutungsgefahren im Bereich der Senken maßgeblich vom Klassifizierungsansatz und insbesondere den dabei festgelegten Klassengrenzen geprägt wird, vor allem bei den 1-parametrischen Ansätzen. Die Abhängigkeit von den Klassengrenzen schränkt die Aussagekraft des Quervergleichs der Varianten natürlich etwas ein. Parallele Untersuchungen für das Beispielgebiet 2 (Hamburg) zeigen jedoch, dass sich trotz deutlich anderer Topografie bei den gleichen Klasseneinteilungen auch ähnliche Gefahrenklassen- und Expositionsanteile in den Varianten einstellen (gesondert in Anhang A-4 dokumentiert).

Darüber hinaus ist auf den Einfluss der **DOM-Vorglättung** auf das Klassifizierungsergebnis hinzuweisen, was insbesondere bei einer Klassifizierung anhand der Retentionshöhe deutlich wird. In Abbildung 5-19 sind vergleichend die Unterschreitungshäufigkeiten der h_{Ret} -Verteilungen für zwei unterschiedliche Vorglättungsvarianten am Beispiel des Untersuchungsgebiets 1 (Saarbrücken) dokumentiert. Zusätzlich sind die resultierenden Gefahrenklassenanteile gemäß Tabelle 5-9 dargestellt. Die beispielhaft gewählte Variante z10520 basiert auf einer Vorglättung von Senken mit einer Mindestausdehnung von $A_{S,max} > 20 \text{ m}^2$ und einem Mindesteinzugsgebiet von $A_E > 5.000 \text{ m}^2$ und ist damit wesentlich stärker ausgeprägt als Variante z10002.

Durch die stärkere Vorglättung in Variante z10520 reduziert sich neben der Senkenanzahl (von 4.375 auf 685) auch die Retentionshöhe für viele der verbleibenden Senken, sodass die Verteilungskurve deutlich weiter links liegt als bei der Vorglättungsvariante z10002. Die Anteile der höchsten Gefahrenklasse steigen an von ca. 4 % auf 25 %, sodass von den verbleibenden Senkenbereichen in Variante z10520 ein tendenziell größeres Gefahrenpotenzial besteht als bei Variante z10002.

Allerdings reduziert sich mit der Senkenanzahl auch deutlich die Anzahl der exponierten Gebäude, sodass die Überflutungsgefährdung nach Variante z10520 der Vorglättung deutlich geringer ist als bei Variante z10002, wie in Abbildung 5-20 für drei Klassifizierungsansätze dokumentiert ist.

Demnach führt eine zu weitreichende DGM-Vorglättung dazu, die Exposition und damit die Überflutungsgefährdung für Gebäude tendenziell zu unterschätzen.

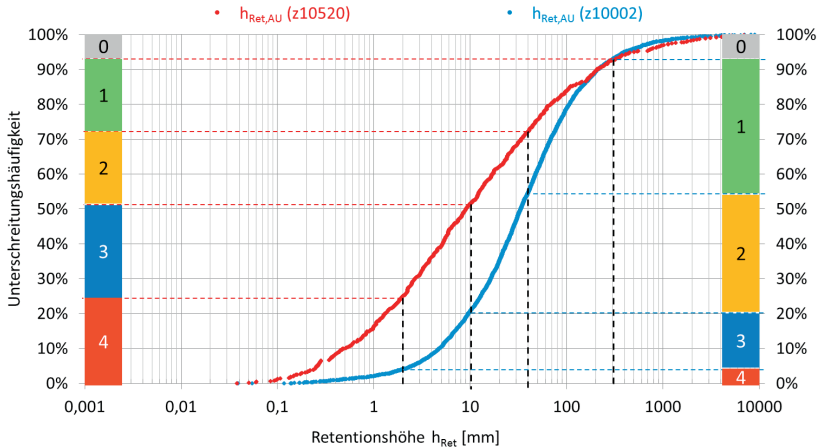


Abbildung 5-19: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen von h_{Ret} und Klassenanteile für die Vorglättungsvarianten z10002 und z10520, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

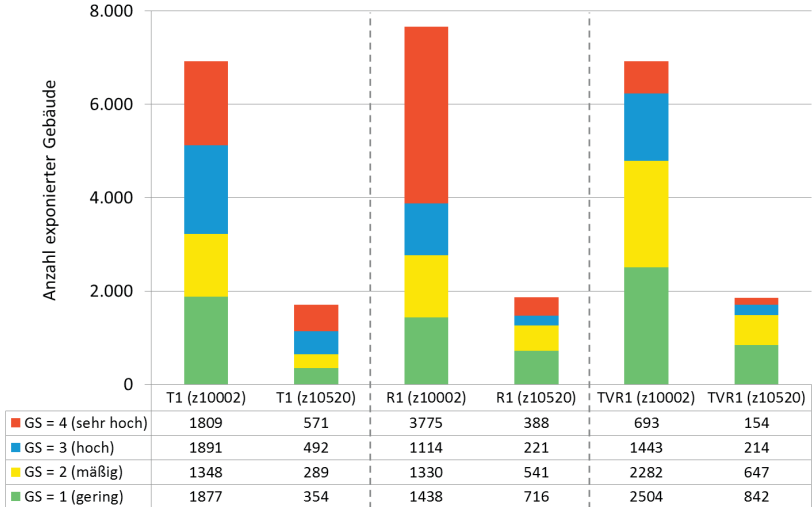


Abbildung 5-20: Auswirkungen der Vorglättungsvarianten z10002 und z10520 auf die Gebäudeexposition für die Klassifizierungsansätze T1, R1 und TVR1, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

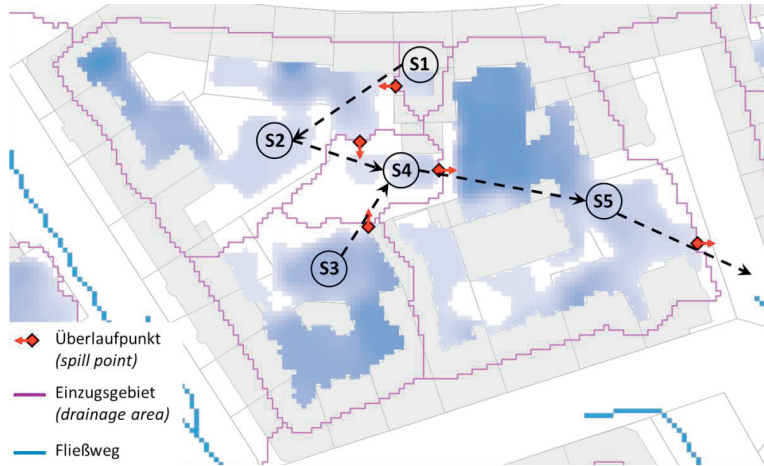
Die Untersuchungen zur Gefahrenklassifizierung im Bereich der Senken belegen, dass mit einer belastungsunabhängigen Methode der Gefährdungsanalyse große Festlegungs- und Interpretationsspielräume existieren, die für die Lokalisierung von Gefährdungszonen und die daraus resultierende Gebäudeexposition ein breites Ergebnisspektrum zulassen. Im Bewusstsein der damit verbundenen Unsicherheiten bei der Gefahrenklassifizierung lassen sich anhand der durchgeführten Variantenuntersuchung folgende Empfehlungen formulieren:

- Ein einzelner Senkenparameter bildet als alleiniger Gefahrenindikator in der Regel die Überflutungsgefahr nicht hinreichend ab. Daher empfiehlt sich die Kombination mehrerer Einzelparameter, um die Gefahrenklassifizierung auf eine „breitere“ Parametergrundlage zu stellen und Risiken der Fehleinschätzung zu reduzieren.
- Die verwendeten Klassifizierungsparameter sollten in einem engen kausalen Zusammenhang zur Überflutungsgefahr stehen und aussagekräftige Indikatoren darstellen. Hierzu zählen die Einstautiefe, das Vollfüllungsvolumen und die Retentionshöhe (vgl. Abschnitt 5.3.1)
- Die Einteilung der Senken in abgestufte Gefahrenzonen (Senkenzonierung) ist sachgerecht und aufgrund des besseren und differenzierteren Gefahrenbildes zu empfehlen.

Zusammenfassend wird empfohlen, die Gefahrenklassifizierung im Bereich der Senken nach **Variante TVR1** vorzunehmen.

5.3.4 Berücksichtigung von Senkenüberläufen

Der in Abschnitt 5.3.1.5 vorgestellte Ansatz der Retentionshöhe h_{Ret} unterliegt insofern einem methodischen Defizit, als mit dem Bezug des Senkenvolumens $V_{\text{S,max}}$ auf das direkte Senkeneinzugsgebiet A_U keine Zuflüsse aus dem Überlaufen oberhalb liegender Senken (Oberlieger) berücksichtigt werden. Diese sind jedoch nur bei „Anfangssenken“, die keine oberhalb liegenden Nachbarsenken aufweisen, auszuschließen. Tatsächlich stellt sich im urbanen Raum bei Starkregen ein über die Fließwege und Überlaufpunkte (*spill points*) verbundenes Senkennetzwerk ein (siehe Abbildung 5-21), in dem jede Senke individuelle Vollfüllungs- und Überlaufbedingungen aufweist (Retentionshöhe, „Rang“ innerhalb der Netzstruktur). Diese Informationen erschließen sich dem Betrachter eines Fließwege- und Senkenplans in keiner Weise, da sich nur Senkenausdehnungen und –einzugsgebiete unmittelbar visuell verarbeiten lassen. Ohne eine gesonderte Generierung der Senkenüberlaufpunkte bereitet auch das Erkennen der Netztopologie mitunter große Schwierigkeiten, wie schon an dem bewusst einfach gewählten Beispiel in Abbildung 5-21 ersichtlich wird.



Geodatengrundlage: © LHS/LVGL (2016)

Abbildung 5-21: Beispiel für die Netztopologie von Senken

Dennoch soll mit der vorliegenden, belastungsunabhängigen Methode der Gefährdungsanalyse eine möglichst zutreffende, allgemein gültige Beschreibung des Gefährdungspotenzials möglich sein. Der Sachverhalt, dass ein erheblicher Anteil der Senken eines Untersuchungsgebiets (sehr) kleine Retentionshöhen aufweist, verdeutlicht, dass Senkenüberläufe bei Starkregen eher weit verbreitete Regelfälle als zu vernachlässigende Ausnahmen darstellen.

Untersuchungen von Scheid und Schmitt (2016) am Projektgebiet Saarbrücken zeigen, dass das auftretende Überlaufvolumen in Relation zum aktivierten Senkenvolumen bedeutsam ist. Für neun ausgewählte Starkregenereignisse der jüngeren Vergangenheit wurden im Fallbeispiel Saarbrücken je Ereignis die Überlaufvolumina aller Senken bilanziert und in Relation zum abgeschätzten Gesamtniederschlagsabflussvolumen gesetzt. Dabei zeigte sich, dass bei allen Starkregenereignissen deutliche Anteile des Niederschlagsabflussvolumens nicht mehr von den jeweiligen Senken aufgenommen werden und als Überlaufvolumen bzw. weitere Zuflüsse für die unterhalb liegenden Nachbarsenken (Unterlieger) zum Tragen kommen. Die Überlaufanteile lagen in dem genannten Beispiel je nach Ereignis zwischen 48 % und 57 % bei Vernachlässigung des Abflussbeitrags der Kanalisation. Aber auch wenn dieser durch pauschale Abschläge mit angesetzt wird (siehe Abschnitt 4.2.5.3), liegen die Überlaufanteile am gesamten oberirdischen Niederschlagsabflussvolumen in einer keinesfalls zu vernachlässigenden Größenordnung. Sie variieren je nach Ansatz des Kanalabflussbeitrags (zwischen 0 mm und 25 mm) von ca. 53 % bis ca. 35 % (Abbildung 5-22).

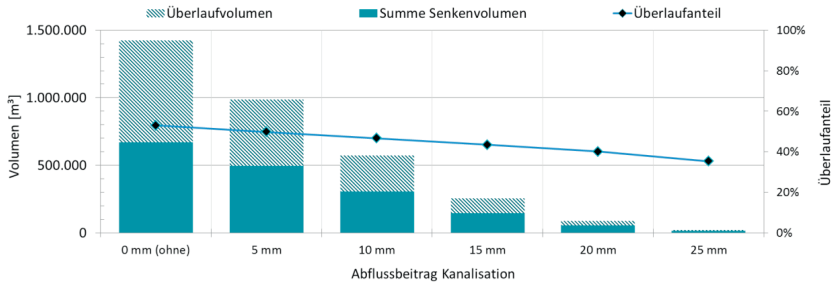


Abbildung 5-22: Überlaufvolumina und -anteile je Ansatz zum Abflussbeitrag der Kanalisation für neun ausgewählte Starkregenereignisse am Beispiel Saarbrücken (Scheid und Schmitt 2016)

Vor diesem Hintergrund ist der Ansatz der Retentionshöhe nach Gleichung (6) zu modifizieren und um den Aspekt des Senkenüberlaufs zu erweitern. Dieser ist auf das vorhandene Vollfüllungsvolumen einer Senke $V_{S,max}$ als Abzug anzurechnen, was eine Abminderung der Retentionshöhe zur Folge hat. Die Retentionshöhe unter Berücksichtigung des Senkenüberlaufs h_{Ret}^* ergibt sich damit zu:

$$h_{Ret,i}^* = \left(V_{S,i,max} - \sum_{k=0}^n V_{Ü,k}(h_N^*) \right) \cdot \frac{1}{A_{U,i}} \cdot 10^3 \quad \text{mm} \quad (7)$$

mit: $h_{Ret,i}^*$ = effektive Retentionshöhe der Senke i [mm]
 $V_{Ü,k}(h_N^*)$ = Überlaufvolumen der Oberliegensenke k
für die maßgebliche Niederschlagshöhe h_N^* [m³]
 n = Anzahl der Oberliegensenken von Senke i

Die maßgebliche Niederschlagshöhe h_N^* , die die Summe des zur Vollfüllung erforderlichen Überlaufvolumens und damit die Retentionshöhe h_{Ret}^* definiert, wird von den h_{Ret}^* -Werten und -Verteilungen aller Oberliegensenken bestimmt. Die Bestimmung dieses Einflusses ist jedoch nicht unmittelbar aus den Standardprozessen der digitalen Geländeanalyse und Senkenberechnung möglich. Hierzu bedarf es der Generierung eines Senkennetzwerkes, mit dem die Überlaufvolumina „nach unten“ weitergegeben und bilanziert werden können. Dies ist GIS-gestützt zwar grundsätzlich möglich (vgl. Zhang und Pan 2014), allerdings mit einem deutlichen Mehraufwand in der GIS-Bearbeitung verbunden. Diesen Mehraufwand gilt es zu hinterfragen angesichts des Anspruchs, mit der GIS-gestützten Auswertung der Topografie über ein einfach und schnell anwendbares Instrumentarium der Gefährdungsanalyse zu verfügen. Hinzu kommt, dass dies auch nur mit groben stationären Näherungen und Vereinfachungen möglich ist, indem bspw. unterstellt wird, dass ein auftretendes Überlaufvolumen unbegrenzt weit und an beliebig viele Unterliegensenken weitergegeben wird.

Der Sachverhalt des Senkenüberlaufs wird beispielhaft an einem kleinen modellhaften Senkennetzwerk mit einfacher Topologie (Abbildung 5-23) erläutert. Weitere Erläuterungen zu diesem und einem weiteren Beispiel befinden sich in Anhang A-5.

Das Modell besteht aus insgesamt fünf Einzelsenken mit unterschiedlichen Retentionshöhen. Diese sind über zwei parallele Stränge (S1-S2) und (S3-S4) miteinander verknüpft und können in Richtung Endsenke S5 überlaufen. In der Abbildung sind ferner die Auslastungsgrade der Einzelsenken für unterschiedliche Niederschlagsabflusshöhen $h_{N,a}$ [mm] grafisch dargestellt. Definitionsgemäß überschreiten die Auslastungskennlinien den Wert 1,0 (Vollfüllung) bei der jeweiligen Retentionshöhe h_{Ret}^* . Die Auswirkungen des Überlaufeffekts auf die Endsenke S5 werden kurz erläutert.

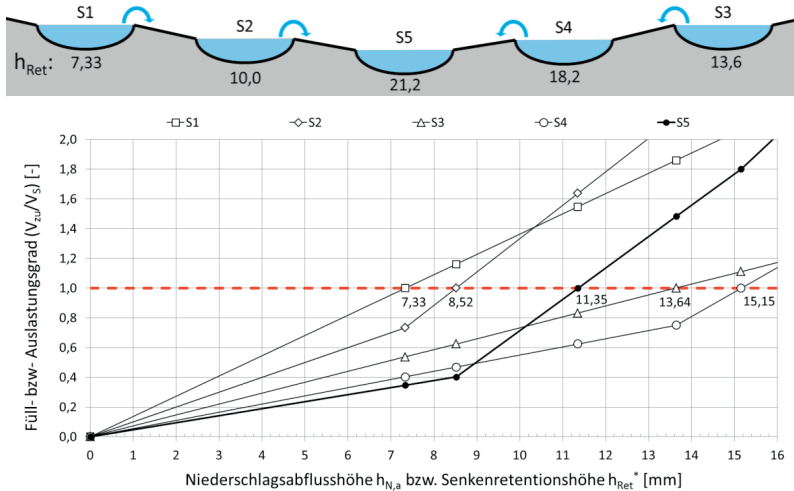


Abbildung 5-23: Modell zum Einfluss des Senkenüberlaufs auf die Retentionshöhe h_{Ret}^* verschiedener Senken

Im Modell sind die h_{Ret} -Werte der Einzelsenken so gewählt, dass sie in Fließrichtung zunehmen und somit ein maximaler Überlaufeffekt stattfindet, weil jede Einzelsenke unter dem Überlaufeinfluss ihrer Oberliegensenke steht. Die Auslastungskennlinien verdeutlichen dies:

Mit Ausnahme der Anfangssenken S1 und S3 weisen alle Auslastungskennlinien einen charakteristischen Knick mit anschließend steilerem Verlauf ab der Niederschlagsabflusshöhe $h_{N,a}$ auf, die der Retentionshöhe h_{Ret} und dem Überlaufbeginn der Oberliegensenke entspricht. Aufgrund der Topologie wird der h_{Ret}^* -Wert der Endsenke S5 von den beiden Oberliegensenken S2 und S4 bestimmt. Im Zahlenbeispiel sind

die geringeren Retentionshöhen der Senkenkaskade S1 - S2 für die Auslastung der Endsenke S5 maßgeblich, deren Retentionshöhe sich unter Überlaufeinfluss auf $h_{Ret}^* = 11,35\text{mm}$ reduziert. Die Überläufe aus der Senkenkaskade S3 - S4 kommen erst nach Vollfüllung von S5 zum Tragen, erkennbar an den höheren h_{Ret}^* -Werten 13,64 mm und 15,15 mm) bzw. am zweiten Steigungsknick der Auslastungskennlinie S5 oberhalb des Vollfüllungsgrades bei $h_{N,a} = 15,15\text{ mm}$ (Abbildung 5-23).

Die Erläuterungen der Modellzusammenhänge verdeutlichen einerseits, dass trotz leicht nachvollziehbarer Modellregeln bereits bei einer einfachen Netztopologie mit wenigen vernetzten Einzelsenken der Überlauftreffpunkt auf eine ausgesuchte Senke nicht mehr ohne weiteres bestimmbar ist. Die effektive Retentionshöhe h_{Ret}^* einer Senke wird exakt von dem Teilabschnitt des oberhalb liegenden Senkennetzwerks definiert, für den die Summe der h_{Ret}^* -Werte der Oberliegensenken minimal ist. Selbst für das einfache reale Beispiel der fünf Senken in Abbildung 5-21 ergeben sich für die Endsenke S5 bereits sieben Teilabschnitte, die für die h_{Ret}^* -Berechnung in Frage kommen.

Umgekehrt zeigen Beispiele, dass der Überlauftreffpunkt nicht immer signifikanten Einfluss auf das tatsächliche Retentionsvermögen einer Senke hat. Je nach Konstellation kann er ggf. nur punktuell, d.h. für einzelne Senken relevant sein und natürlich auch in seiner Ausprägung, konkret in der Abminderung gegenüber der Retentionshöhe ohne Überlaufeinfluss (h_{Ret}), stark variieren. Hinzu kommt, dass man bei einer solchen Modellierung die vorhandene zeitliche Dynamik dieses hydraulischen Prozesses nicht adäquat abbilden kann. So ist bspw. davon auszugehen, dass über längere Zeiträume auch die Wechselwirkung mit der Kanalisation zum Tragen kommt, indem die in urbanen Senken häufig angeordneten Einlaufpunkte (Straßen- und Hofeinfälle, Kastenrinnen, etc.) einen Teil des Senkeneinstaus aufnehmen und unterirdisch abführen. Insofern ist kritisch zu hinterfragen, ob ein solcher modellhafter Überlauftreffpunkt tatsächlich unbegrenzt weit für die unterhalb folgenden Senken in Erscheinung tritt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Überlauftreffpunkt maßgeblich die Wahrscheinlichkeit und das Ausmaß einer Senkenfüllung beeinflussen kann. Bei der näheren Quantifizierung dieses Effekts stößt man im Rahmen einer topografischen Gefährdungsanalyse jedoch rasch an methodische Grenzen. Diese lassen sich durch den GIS-gestützten Aufbau bspw. eines geometrischen Netzwerks zur Abbildung der Senkentopologie mit anschließender h_{Ret}^* -Berechnung zwar grundsätzlich überwinden. Dennoch muss man erkennen, dass sich bei einem Untersuchungsgebiet mit mehreren Hundert Senken ein unverhältnismäßig hoher Bearbeitungsaufwand ergibt, was die Praxistauglichkeit in Frage stellt. Bezüglich der Gefährdungsklassifizierung von Senken wäre der Überlauftreffpunkt bei allen auf der Retentionshöhe beruhenden Klassifizierungsansätzen (Varianten R0, R1 und TVR1, vgl. Abschnitt 5.3.3) zu berücksichtigen. Bei Senken, die vom Überlauf betroffen sind, kann es zu einer Unterschätzung der Überflutungsgefährdung kommen, weil sich kategorisch die Retentionshöhe verkleinert ($h_{Ret} \geq h_{Ret}^*$). Dieser Sachverhalt ist bei der Auswertung der

Gefahrenkarte und Weiterverarbeitung der Information zu beachten. Als grobe Hilfestellung zur räumlichen Eingrenzung des Überlaufeffekts können großvolumige Senken mit entsprechend hohen Retentionshöhen, die dementsprechend für die meisten Überflutungsereignisse als „Überlaufbarriere“ dienen, über eine Abfrage lokalisiert werden. Die Größenordnung der Zahlenwerte für $V_{S,max}$ und h_{Ret} sind entsprechend der Gebietscharakteristik und hydrologischen Randbedingungen nach Ermessen festzulegen, bspw. mit $V_{S,max} \geq 200 \text{ m}^3$ und $h_{Ret} \geq 150 \text{ mm} - 200 \text{ mm}$. Diese Senkenauswahl sollte konsequenterweise den Festlegungen zur Fließwegakkumulation entsprechen und gleichzeitig die Endpunkte der Flutachsen und Hauptfließwege markieren.

5.4 Überflutungsgefährdung entlang der Fließwege

Zur Untersuchung der Überflutungsgefährdung entlang der Fließwege wird zunächst kurz auf den Einfluss unterschiedlicher Algorithmen der Fließweggenerierung eingegangen. Danach werden ergänzend zu den Ausführungen in Abschnitt 4.2.5.2 die unterschiedlichen Randbedingungen und Parameter zur Ermittlung oberirdischer Fließwege am Fallbeispiel untersucht und daraus Aussagen zur Klassifizierung der Überflutungsgefährdung entlang der Fließwege formuliert.

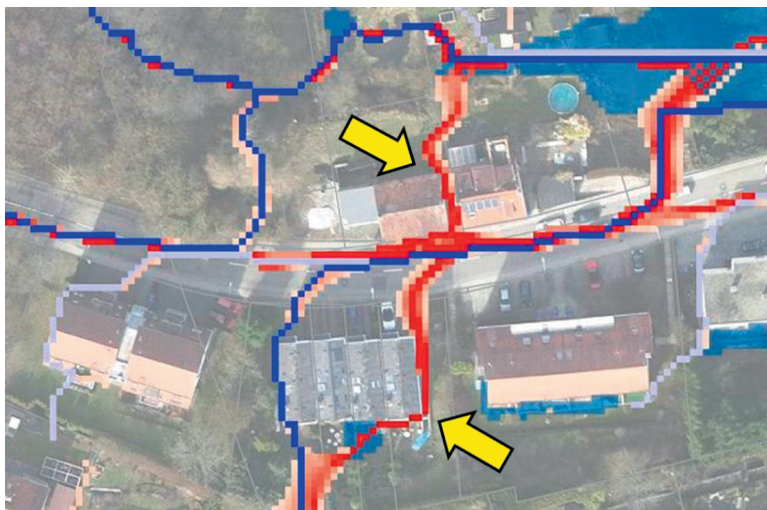
Bei der Gefahrenklassifizierung der Fließwege ist generell ist zu bedenken, dass unabhängig vom angewendeten Akkumulationsalgorithmus die ausgewiesenen Fließwege und Flutachsen nur „statische“ Ersatzgrößen für die hydrodynamischen Abflussprozesse darstellen. Die tatsächliche, räumlich-zeitliche Ausprägung des oberirdischen Abflussgeschehens bei Starkregenüberflutungen können damit nicht adäquat wiedergeben werden. Insofern lassen sich die entlang der Fließwege einstellenden Gefährdungsbereiche methodisch bedingt nur eingeschränkt und stark vereinfacht darstellen, was sich auch in den Ansätzen zur Gefährdungsklassifizierung entlang der Fließwege widerspiegelt.

Aufgrund des belastungsunabhängigen Ansatzes beschränkt sich die Auswahl geeigneter Indikatoren zur Beschreibung der Gefährdung entlang der Fließwege auf die rasterbezogene akkumulierte Einzugsgebietsgröße sowie die zugehörige Breitenfestlegung zur Darstellung der räumlichen Fließwegausdehnung. Im Rahmen der Gefahrenklassifizierung sind für beide u. a. geeignete Mindestwerte zu definieren.

5.4.1 Einfluss unterschiedlicher Fließwegalgorithmen

Am Beispiel des Untersuchungsgebiets 1 (Saarbrücken) wurden vergleichende Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Fließwegalgorithmen (vgl. Abschnitt 4.2.4) durchgeführt. Die Betrachtungen beziehen sich auf die beiden eindirektionalen Algorithmen D8 (nach Mark 1984) und D_{∞} (nach Tarboton 1997), die standardmäßig in den meisten GIS integriert bzw. als freie Applikation verfügbar sind.

Im Vergleich der beiden Algorithmen ist zu erkennen, dass sich bei D_{∞} in weiten Bereichen breitere Abflusskorridore einstellen, die insgesamt auch eine größere Realitätsnähe widerspiegeln. Darüber hinaus ist jedoch bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet eine sehr gute, weitreichende Übereinstimmung beider Fließwegverläufe vorhanden. Signifikante Abweichungen, die zu unterschiedlichen Gefährdungsinformationen führen können, liegen nur vereinzelt vor, wie in Abbildung 5-24 (gelbe Pfeile) dargestellt. Tendenziell ist feststellbar, dass der D_{∞} -Algorithmus auch alle Fließwege gemäß D8 abbildet, sodass das resultierende Gefahrenbild nach D_{∞} umfangreicher ist. Allerdings relativieren sich die Unterschiede etwas durch die gesonderte Breitenfestlegung der Gefährdungszonen bei D8 (Abschnitt 5.4.4), sodass auch mit diesem Ansatz im Rahmen der Abbildungsgenauigkeiten zufriedenstellend gearbeitet werden kann.



Geodatengrundlage: © LHS/LVGL (2016)

Abbildung 5-24: Ausgewähltes Beispiel für abweichende Gefährdungsergebnisse aufgrund unterschiedlicher Fließwegalgorithmen, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken) (D8: blau abgestuft und D_{∞} : rot abgestuft)

5.4.2 Mindestwert der akkumulierten Einzugsgebietsgröße

Die akkumulierte Einzugsgebietsgröße, die jedem Fließwegrasterfeld zugeordnet ist, steht als Indikator für die Größe des potenziellen Oberflächenabflusses bei einem Starkregenereignis. Hierfür ist ein geeigneter Mindestwert festzulegen, ab dem der Oberflächenabfluss eine signifikante Überflutungsgefahr darstellt und der Fließweg als Gefahrenzone „beginnt“. Da bei einem belastungsunabhängigen Verfahren wie der topografischen Analyse die vielfältigen Einflussparameter des Abflussprozesses unberücksichtigt bleiben, lässt sich dieser nur grob abschätzen. Der von Zhang und Pan (2014) vorgeschlagene Grenzwert von 1 % der maximalen Fließweglänge im Untersuchungsgebiet zielt primär auf eine geeignete Darstellung im Kartenwerk ab, stellt jedoch keinen schlüssigen Bezug zur Abflussgröße her.

Es wird stattdessen empfohlen, die Abschätzung der Starkregenabflüsse anhand der Niederschlagsbelastung vorzunehmen bzw. den mit der akkumulierten Einzugsgebietsgröße korrespondierenden Oberflächenabfluss bezogen auf eine Referenzniederschlagsbelastung zu bewerten. Dies sollte ortsbezogen erfolgen, da die in KOSTRA-DWD 2010 (DWD 2016) erfassten statistischen Niederschlagshöhen insbesondere für seltene Starkregenereignisse deutschlandweit breiter streuen können. Die vorliegend betrachteten drei Untersuchungsgebiete weisen für eine festgelegte Referenzregendauer von 15 min für $T_n = 10$ a bis 100 a Regenspenden zwischen ca. 200 l/(s·ha) und 300 l/(s·ha) auf (siehe Tabelle 5-12). Parallel dazu kann aus Wasserstands-Abfluss-Berechnungen anhand des empirischen Fließgesetzes nach Gauckler-Manning-Strickler (vgl. Bollrich 2000, S. 246) vereinfacht abgeleitet werden, dass sich bei begrünten bzw. asphaltierten Oberflächen überflutungssignifikante Fließtiefen (ab 10 cm) erst für Abflüsse $Q_R > 100$ l/(s·m) bzw. $Q_R > 200$ l/(s·m) einstellen (Abbildung 5-25).

Tabelle 5-12: Regenspenden ausgewählter Starkniederschläge nach (DWD 2016) für die Untersuchungsgebiete 1 bis 3

Untersuchungsgebiet	Rasterfeld KOSTRA-DWD	Regenspenden [l/(s·ha)]				
		$r_{15,0,1}$	$r_{15,0,05}$	$r_{15,0,033}$	$r_{15,0,02}$	$r_{15,0,01}$
1 - Saarbrücken	S09 / Z78	203,3	232,4	249,5	270,9	300,0
2 - Hamburg	S36 / Z23	196,7	224,1	240,1	260,4	287,8
3 - Neuwied	S14 / Z72	195,6	222,6	238,5	258,5	285,6

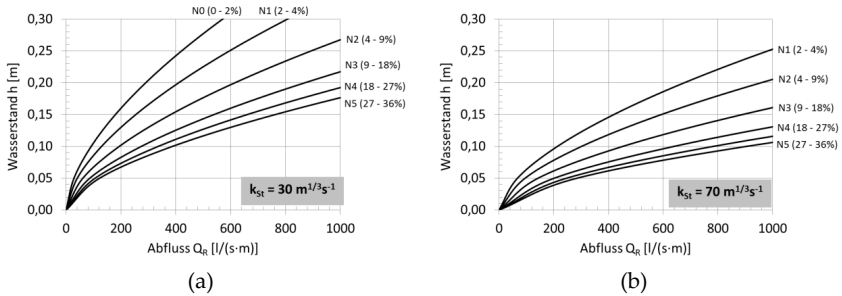


Abbildung 5-25: Breitennormierte Abfluss-Wasserstands-Beziehungen nach Gauckler-Manning-Strickler für verschiedene Neigungsstufen bei (a) Grünland / Vegetation und (b) Asphalt (eigene Darstellung)

Auf Grundlage der genannten Wertebereiche lässt sich als sachgerechter Orientierungswert für den „Beginn“ eines Fließweges als Gefahrenzone eine akkumulierte Einzugsgebietsgröße von $A_U = 0,5 \text{ ha}$ bis $A_U = 1,0 \text{ ha}$ ansehen. Auch wenn sich die Überflutungsgefahr entlang eines Fließweges nicht einzig über einen pauschalen Abflussbetrag beschreiben lässt, sondern das Resultat verschiedener Komponenten ist (vgl. Tabelle 4-1, Abschnitt 4.2.1), so ist diese Vorgehensweise dennoch im Rahmen der allgemein vorherrschenden Ungenauigkeiten gegenüber einer Pauschalfestlegung anhand der maximalen Fließweglänge des Untersuchungsgebiets (vgl. Zhang und Pan 2014) zu bevorzugen.

Der vorgeschlagene Mindestwert der akkumulierten Einzugsgebietsgröße ist als grober Anhaltswert zu verstehen und sollte ergänzend anhand der Kartendarstellung in der Gefahrenkarte bewertet werden. Denn schließlich geht es bei dieser Festlegung auch um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen einer geeigneten Übersichtlichkeit der Fließwegpläne und einer zutreffenden Gefährdungsdarstellung. Allerdings ist die Gefahr, bei (zu) groß gewählten Anfangswerten der Fließwege überflutunggefährdete Bereiche zu übersehen, von untergeordneter Bedeutung, da diese lediglich mit der geringsten Gefahrenklasse belegt werden.

5.4.3 Ansätze zur Gefahrenklassifizierung der Fließwege

Neben dem Beginn der Fließwegdarstellung sind die weiteren Gefahrenklassen entlang der Fließwege samt Grenzen festzulegen. Hierfür gibt es keine allgemeingültigen Empfehlungen, denn es fehlen, ähnlich wie bei Beurteilung von Senkengrößen oder –volumen, eindeutige sachliche Festlegungskriterien. Tabelle 5-13 macht einen Vorschlag zur Festlegung der Gefahrenklassen über die akkumulierte Einzugsgebietsgröße, vergleichbar mit DWA-M 119 (DWA 2016). Je nach Charakteristik und Topografie des Untersuchungsgebiets kann die Klasseneinteilung angepasst werden, beispielsweise, wenn das Untersuchungsgebiet hohe Fließgefälle aufweist. In diesem

Fälle wären hierfür kleinere Schwellenwerte angebracht, sofern dieser Aspekt nicht durch einen gesonderten Zuschlag auf die Gefahrenklasse verarbeitet wird. Umgekehrt ist die Klassenfestlegung im Sinne einer ausgewogenen, gleichmäßigen Verteilung der Gefahrenklassen kritisch zu bewerten. Die Größe des Untersuchungsgebiets sollte keinen Einfluss auf die Festlegung der Klassengrenzen haben: Wenn man über die Anzahl der akkumulierten Rasterfelder einen qualitativen Zusammenhang zur Abflussstärke und der damit verbundenen Überflutungsgefahr herstellt, so ist es in Konsequenz sachgerecht, dass vergleichsweise kleine Plangebiete aufgrund tendenziell kürzerer Fließwege auch geringere Fließweganteile mit „hoher“ Überflutungsgefahr aufweisen als große Untersuchungsgebiete. Ergänzend kann bei sehr großen Untersuchungsgebieten überlegt werden, das Gefahrenspektrum über eine weitere Klasse (z. B. Klasse 4 „sehr hoch“, siehe Tabelle 5-13) zu erweitern. Generell sollten die Klassifizierungsergebnisse der Fließwege mit der entsprechenden Ortskenntnis und eventueller Erfahrungen mit Überflutungsereignissen plausibilisiert werden.

Tabelle 5-13: Vorschlag für Gefahrenklassen von Fließwegen GF anhand der akkumulierten Einzugsgebietsgröße

Gefahrenklasse GF	Überflutungsgefahr	Charakteristik / Beschreibung	akkum. Einzugsgebietsgröße
0	sehr gering	abseits eines Fließwegs	< 0,5 ha
1	gering	Nebenfließweg	≥ 0,5 ha bis < 2 ha
2	mäßig	Hauptfließweg	≥ 2 ha bis < 10 ha
3	hoch	Flutachse	≥ 10 ha (ggf. bis < 50 ha)
(4)	(sehr hoch)	(Hauptflutachse)	(≥ 50 ha)

Wie bereits in Abschnitt 5.2.2 erläutert, beeinflusst die DOM-Vorglättung die Fließwegcharakteristik und damit auch die Gefahrenklassifizierung entlang der Fließwege. Zur Bewertung dieses Sachverhalts wurde anhand des Untersuchungsgebiets 1 für unterschiedliche Glättungsvarianten die jeweilige Gebäudeexposition entlang der Fließwege ermittelt. Der Auswertung liegt die Klassifizierung nach Tabelle 5-13 und eine einheitliche Fließwegbreite von drei Rasterfeldern zu Grunde.

Die Auswertung (Abbildung 5-26) zeigt zwar einen erkennbaren Einfluss der Vorglättung auf die Anzahl der exponierten Gebäude. Dieser ist aber nur von nachrangiger Bedeutung für das Gesamtbild der Überflutungsgefährdung entlang der Fließwege, da der Anteil der exponierten Gebäude mit maximal ca. 4 % durchweg in einem sehr niedrigen Bereich liegt.

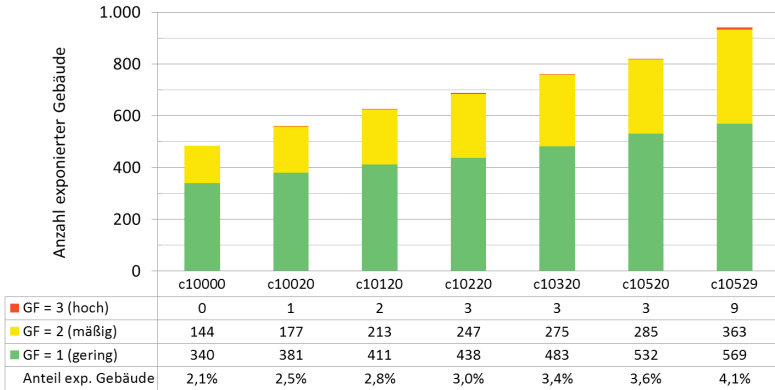


Abbildung 5-26: Anzahl exponierter Gebäude je Glättungsvariante und Fließweg-Gefährdungsklasse (GF), Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

5.4.4 Breitenfestlegung der Gefahrenzone entlang der Fließwege

Bei der GIS-gestützten Ausweisung von Gefahrenzonen entlang der Fließwege ist zu beachten, dass single-flow-Algorithmen (siehe Abschnitt 4.2.4) nur ein einziges Rasterfeld als Fließweg in Gefällerrichtung ausweisen und damit keine Information über die Breite des sich einstellenden Abflussgerinnes vorliegt. Die Beobachtungen bei Starkregenüberflutungen und urbanen Sturzfluten belegen, dass sich die ausbildenden Oberflächenabflüsse bei entsprechend großen Abflüssen in der Regel über mehrere Meter Breite bzw. über die gesamte Breite des Straßenraums ausdehnen. Daher bedarf es einer sinnvollen methodischen Abbildung dieses Prozesses, indem mit Zunahme von Fließweglänge und Oberflächenabfluss der dargestellte Gefahrenkorridor verbreitert wird. Die Auswirkungen dieses GIS-technisch sehr einfach realisierbaren Arbeitsschrittes auf die Gebäudeexposition werden anhand des Untersuchungsgebiets 1 gezeigt. Für die beiden Extremvarianten der Glättungsuntersuchungen (c10000 und c10529) wurden die Fließwege nach Tabelle 5-13 klassifiziert und um jeweils ein, zwei und drei Rasterfelder verbreitert, woraus Gefahrenzonen von 3 m, 5 m und 7 m resultieren (Abbildung 5-27). Es ist erwartungsgemäß eine deutliche Zunahme der Gebäudeexposition mit der Verbreiterung zu erkennen, was die Relevanz dieses Aspekts für die Gefährdungsanalyse verdeutlicht. Gemessen an Beobachtungen realer Starkregenereignisse führen Fließwegverbreiterungen zu deutlich realitätsnäheren Gefährdungsabbildungen. Es wird daher empfohlen, eine kategoriale Verbreiterung, beispielsweise um drei Rasterfelder bzw. 3 m, vorzunehmen. Dennoch sollten die methodischen Einschränkungen der gesamten Vorgehensweise bei der Ausweisung von Gefahrenzonen entlang der Fließwege beachtet und insbe-

sondere bei der Plausibilisierung der Ergebnisse bzw. der Gefahrenkarte berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 7.2).

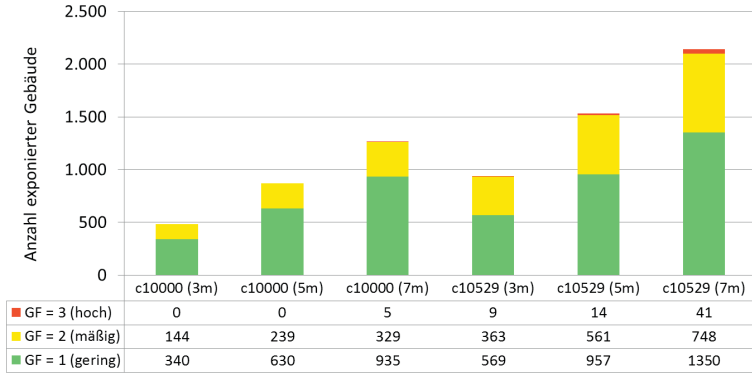


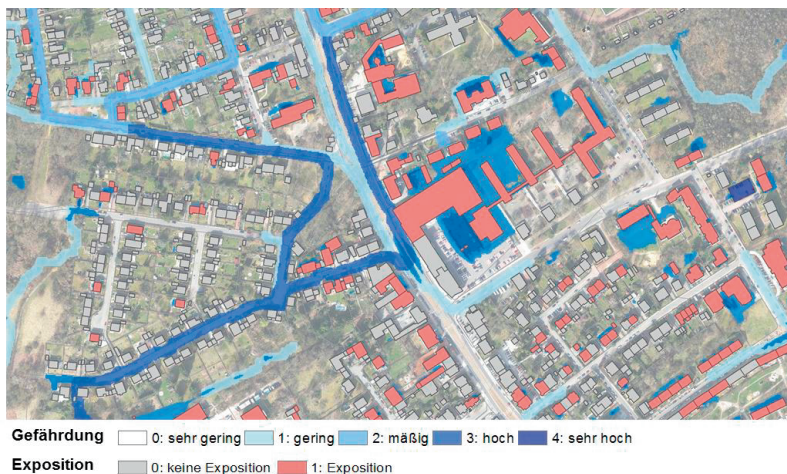
Abbildung 5-27: Anzahl exponierter Gebäude je Fließweg-Gefährdungsklasse (GF) für unterschiedliche Fließwegbreiten, Varianten c10000 und c10529, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

5.5 Starkregen-Gefahrenkarte

Wenn zur Ergebnisvisualisierung der Gefährdungsanalyse nach Merkblatt DWA-M 119 von einer Starkregen-Gefahrenkarte gesprochen wird, so geschieht dies ohne weitere Differenzierung nach der angewandten Methodik oder den dargestellten Inhalten, jedoch in beabsichtigter Anlehnung an die bereits etablierten Hochwassergefahrenkarten. Für die topografische Gefährdungsanalyse als belastungsunabhängiger Ansatz, der die Gesamtheit der möglichen Gefährdungsausprägungen mit maximalen Senkentiefern und -ausdehnungen darstellt, wäre „Gefährdungspotenzial“ begrifflich zutreffender (vgl. RISA 2014). Gefahren- bzw. Gefährdungskarten blieben danach den belastungsabhängigen Verfahren vorbehalten, die simulationsgestützt Wasserstände, Abflüsse und Fließgeschwindigkeiten für eine zugehörige Ereigniswiederkehrzeit ausweisen. Im Sinne eines einheitlichen, regelwerkskonformen Sprachgebrauchs wird jedoch auf die beschriebene Differenzierung vorliegend verzichtet und der Terminus „Gefahrenkarte“ verwendet.

Die Gefahrenkarte der vorgestellten Methodik ist ein klassifizierter Fließwege- und Senkenplan, d. h. sie beinhaltet die nach Abschnitt 4.2.5.4 zusammengeführten Ergebnisse der Senken- und Fließwegklassifizierung. Diese ist unterteilt in insgesamt sechs Einzelklassen (Klassenwerte 0 bis 5, siehe Abbildung 5-28), wobei die höchste Klasse 5 den möglichen Zuschlägen auf die Senken geschuldet ist (vgl. Abschnitt 4.2.5.3). Mit sechs Klassen wird auch eine Unterteilungsqualität erreicht, die

sich sowohl noch verbal einprägsam als auch darstellungstechnisch mit geeigneten Farbabstufungen umsetzen lässt. Es kann jedoch bei Bedarf auch eine weitere Aggregation der Klassen vorgenommen werden. In einem weiteren Schritt empfiehlt es sich, mit der wahlweise binär oder klassifiziert ermittelten Gebäudeexposition (siehe Abschnitt 4.4) die Gefahrenkarte zu einer Expositionskarte zu erweitern.



Geodatengrundlage: © LHS/LVGL (2016)

Abbildung 5-28: Beispiel der Starkregen-Gefahrenkarte mit sechs Gefährdungszonen und der Gebäudeexposition, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

Auf Grundlage der angestellten Detailuntersuchungen zu den datenbezogenen und methodischen Einschränkungen ergeben sich folgende Darstellungsbesonderheiten und Empfehlungen:

- Für eine sachgerechte, bestmögliche Gesamtdarstellung der belastungsunabhängigen Gefährdungslage ist es zwingend erforderlich, die Gefahrenklassifizierungen senken- und fließwegspezifisch vorzunehmen, d. h. diese auf zwei unterschiedliche Glättungsansätze des DOM zu stützen (siehe Abschnitt 5.2.2.3).
- Im Rahmen der Darstellungsmöglichkeiten sind solche Bereiche in denen das DGM die stärksten methodisch erforderlichen Anpassungen aufweist, gesondert zu markieren. Einerseits sind dies Bereiche mit deutlich verminderter Punktdichte (ehemalige DGM-Lücken, siehe Abschnitt 5.2.1) und andererseits Senkenrandbereiche ohne Gefahrenrelevanz (siehe Abschnitt 5.3.3.3)

Für die genannten ergänzenden Karteninhalte sollte eine zurückhaltende Darstellungsart gewählt werden, um die primären Kartenaussagen nicht zu beeinträchtigen.

5.6 Fazit zur topografischen Gefährdungsanalyse

Der Prozess der Gefährdungsanalyse verfolgt allgemein die beiden Hauptziele der **Identifikation** von signifikanten Gefahrenbereichen für Starkregenüberflutungen und darauf aufbauend der **Bewertung und Klassifizierung** dieser Bereiche für die anschließende Risikobetrachtung. Bezüglich dieser Zielsetzungen lassen sich für die topografische Gefährdungsanalyse anhand der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Detailuntersuchungen die nachfolgenden Schlussfolgerungen ableiten.

Die **Identifikation vorhandener Gefahrenbereiche** wird im Wesentlichen von der Qualität (Auflösung) des DGM und dessen Aufbereitung (Interpolation und Vorglättung) bestimmt:

- Mit den inzwischen bundesweit verfügbaren DGM1 steht für die Anwendung der topografischen Gefährdungsanalyse eine ausreichend hoch aufgelöste, gut geeignete Datengrundlage zur Verfügung. Sie ermöglicht im Rahmen des Genauigkeitsanspruchs die Erzeugung zuverlässiger Gefahreninformationen. Natürlich steigt mit zunehmender Auflösung auch die Abbildungsgüte an. Der subjektive Einfluss des Bearbeitenden ist dabei vergleichsweise gering und auf die Interpolation von DGM-Lücken und objektbezogene Einzelkorrekturen (z. B. Elimination von Brücken und Durchlässen) beschränkt.
- Demgegenüber unterliegt die Weiterverarbeitung des DOM und die daraus generierten Ergebnisse sehr stark subjektiven Bearbeitungseinflüssen: Die Untersuchungen zur Vorglättung (Abschnitt 5.2.2.3) verdeutlichen, dass bei der Ermittlung von Senken und Fließwegen unterschiedliche Glättungsrandbedingungen gelten. Während für die Senkenevaluation eine schwache Vorglättung ratsam ist, damit potenzielle Gefahrenbereiche nicht a priori verloren gehen, bedarf es bei der Identifikation von wichtigen Fließwegen und zentralen Flutachsen einer stärkeren Vorglättung, die den bei vielen Starkregenereignissen ausgeprägten Überlaufeffekt von Senken mit Fortsetzung des Fließwegs abbildet. Methodisch sollte die fließwegbezogene Vorglättung nur Senken mit einer sehr hohen Retentionshöhe (z. B. $h_{\text{Ret}} > 200$ mm) berücksichtigen.
- Die methodische Berücksichtigung von Senkenüberläufen erfordert die Erstellung einer Netztopologie, was je nach Gebietsgröße und eingesetztem GIS-Produkt aufwändig sein kann und dem Anwendungsanspruch an die topografische Gefährdungsanalyse als schnelle und einfache Methodik widerspricht. Zur Abschätzung dieses Effekts können alternativ für größere Teilbereiche die Senkenvolumen und zugehörigen Flächengrößen aggregiert werden oder abgestufte Auslastungsberechnung der Senken mit verschiedenen Einzelniederschlagshöhen durchgeführt und bewertet werden.

Bei der **Bewertung der Überflutungsgefährdung** ist ebenfalls eine große Bandbreite an Ergebnissen möglich. Dementsprechend sollten bei der Gefahrenklassifizierung die nachfolgenden Hinweise beachtet werden.

- Zur Gefahrenklassifizierung der Senken kommen verschiedene, unterschiedlich gut geeignete Parameter in Frage. Die topografische Gefährdungsanalyse als belastungsunabhängige Methode stellt dabei aufgrund des fehlenden Bezugs zu Eintrittswahrscheinlichkeiten gesonderte Anforderungen an die Gefahrenklassifizierung. Die Gefährdung korreliert allgemein mit dem Ausmaß der Exposition, konkret der räumlich-zeitlichen und mengenmäßigen Überflutungseinwirkung auf ein Risikoobjekt. Keiner der verfügbaren Gefahrenindikatoren (z. B. Tiefe, Volumen oder Ausdehnung einer Senke) ist hinreichend geeignet, dieses Expositions- bzw. Gefährdungsausmaß zu quantifizieren.
- Insofern wird empfohlen, sowohl die Senkenauswahl als auch die Gefahrenklassifizierung anhand einer Parameterkombination vorzunehmen. Damit werden die Bewertungsunsicherheiten einzelner Parameter, wie z. B. der nicht berücksichtigte Überlaufeffekt der Retentionshöhe h_{Ret} , ausgeglichen. Auf Grundlage der vorliegenden Untersuchungen wird eine Kombination aus Retentionshöhe und Senkengröße (definiert durch Volumen und Tiefe) als sachgerechter Klassifizierungsansatz angesehen (Variante TVR1, Abschnitt 5.3.3.5).
- Für die Bewertung der Überflutungsgefahren entlang der Fließwege sind die Anwendungsspielräume etwas geringer als bei den Senken. Die für jede Fließwegrasterzelle ermittelte akkumulierte Einzugsgebietsgröße als Ersatzgröße des Oberflächenabflusses bei Starkregen ist als Standardparameter der Klassifizierung obligatorisch. Subjektive Festlegungen können bei der Auswahl des verwendeten Akkumulationsalgorithmus sowie für Beginn und Breite der Gefahrenzone entlang der Fließwege getroffen werden. Multidirektionale Algorithmen liefern gegenüber eindirektionalen zwar eine realitätsnähere Fließwegeermittlungen, sind jedoch nicht in allen GIS verfügbar. Aber auch für sie ist aufgrund der fehlenden Fließtiefe und Ausbreitung des Oberflächenabflusses die Breite des Fließwegkorridors gesondert festzulegen. Insgesamt unterliegt die Gefahrenbewertung entlang der Fließwege größeren methodischen Unsicherheiten.
- Die Aussagegrenzen der topografischen Gefährdungsanalyse sind erreicht, wenn hydrologische oder gar hydraulische Prozesse in ihrer räumlichen und vor allem zeitlichen Dynamik methodisch zu einer Gefährdungsinformation verarbeitet werden sollen. Daher ist vor allem die Aussagegüte zu den „dynamischen“ Gefahrenkomponenten (Fließwege, Senkenüberlauf) limitiert.

Ein generelles Problem bei den subjektiven Anwendungsfestlegungen besteht in den unzureichenden Möglichkeiten der Ergebnisvalidierung, die daher noch durch vergleichsweise grobe, qualitative Ergebnisplausibilisierungen ersetzt werden müssen. Einzelheiten hierzu sind in Abschnitt 7.2 näher beschrieben.

6 Untersuchungen zur Schadenspotenzialanalyse

Aufgrund der bereits thematisierten Ungenauigkeiten und Schwierigkeiten bei der Identifikation, quantitativen Beschreibung und Bewertung potenzieller Schäden in ihrer Gesamtausprägung verbindet sich mit dem Begriff „Schadenspotenzialanalyse“ ein hohes Maß an Aussagequalität und Ergebnisverbindlichkeit, das sich methodisch nur unzureichend abbilden lässt. Stattdessen erfolgt durch die Verwendung von Indikatoren eine mehr oder weniger zutreffende Abschätzung mittlerer Schadenspotenziale. Da sich der Begriff „Schadenspotenzialanalyse“ jedoch als methodisches Pendant zur Gefährdungsanalyse für Starkregenüberflutungen sprachlich etabliert hat, wird er auch hier verwendet.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen zur Schadenspotenzialanalyse wird zunächst die verfügbare Datengrundlage für die Schadenspotenzialanalyse hinsichtlich ihrer Eignung zur Beschreibung der Schadenspotenzialindikatoren näher analysiert und dabei insbesondere auf die Bedeutung der wichtigsten frei verfügbaren Datenquelle der amtlichen Liegenschaftsinformationen eingegangen.

Daran anschließend wird die pauschale Abschätzung des Schadenspotenzials für Gebäude und gesonderte Risikoobjekte auf Grundlage der ALKIS®-Nutzungsdaten in drei abgestuften Untersuchungen mit unterschiedlich detaillierter Berücksichtigung der Datengrundlage näher analysiert. Ein besonderes Augenmerk liegt auf den mit der pauschalen Schadenspotenzialbewertung verbundenen Unsicherheiten der Klassifizierung.

6.1 Analyse der Datengrundlage

6.1.1 Einsatzbereiche und Ergebnisrelevanzen

In Analogie zu Abschnitt 5.1 werden auch die Datengrundlagen, die zur Beschreibung der Bewertungsindikatoren des Schadenspotenzials (Abschnitt 4.3.2) verwendet werden können, näher beschrieben. In Tabelle 6-1 sind diese hinsichtlich ihrer Bedeutung und Ergebnisrelevanz zusammengestellt. Es gilt dabei die in Abschnitt 5.1 verwendete Kategorisierung von „essenziell“ bis „nachrangig erforderlich“.

Bereits die Zusammenstellung der Schadenspotenzialindikatoren in Tabelle 4-3 (Seite 97) verdeutlicht, welche herausragende Bedeutung bei der flächendeckenden Schadenspotenzialanalyse den Informationen zur Gebäudegestaltung (Untergeschosse, etc.) und Gebäudenutzung, aber auch zur Flächennutzung zukommt. Inso-

fern sind die amtlichen Liegenschafts- und Katasterinformationen (ALKIS®) als **essenzielle Datengrundlage** anzusehen, die im nachfolgenden Abschnitt gesondert beschrieben und ausgewertet werden. Die gleiche Bedeutung wird Digitalen Orthophotos (DOP) beigemessen. Diese liefern zusätzliche, wertvolle Erstinformationen zur Gebäude- und Flächennutzung, aber auch zu weiteren schadenspotenzialrelevanten Details, wie Zufahrten und Zugänge zu Untergeschossen oder unterirdischen Gebäuden (Tiefgaragen, Passagen, etc.). Es lässt sich damit neben den Visualisierungsmöglichkeiten auch der erforderliche Umfang von Ortsbegehungen festlegen und eingrenzen. In diesem Zusammenhang sind auch die Erkundungsmöglichkeiten über webbasierte 3D-Kartendienste (z. B. Google Street View) zu nennen. Über solche Onlinedienste lassen sich gewissermaßen als „virtuelle Ortsbegehung“ optional weitere Informationen zu den oben genannten Details gewinnen. Solche Dienste stehen jedoch nicht flächendeckend zur Verfügung. Das Angebot von Google Street View beispielsweise umfasst nur die 20 größten Städte Deutschlands und wird auch seit 2010 nicht mehr aktualisiert (Heuzeroth 2015). Zudem sind die Informationen nicht unmittelbar GIS-gestützt verwertbar und gesondert zu erfassen.

Tabelle 6-1: Datenpools der Schadenspotenzialanalyse mit Bewertung des jeweiligen Datenbedarfs, verändert nach (Schmitt und Scheid 2014)

Datenpool	Datengrundlage	Relevanz
Informationen Projektgebiet	<i>Katasterinformationen (ALKIS®) zu Gebäuden und Flurstücksflächen, Nutzungsinformationen</i>	++++
	<i>Digitale Orthophotos (ATKIS®-DOP)</i>	++++
	<i>Teilflächendaten zur Oberflächenbefestigung (z.B. Versiegelungskataster)</i>	+++
	<i>Webbasierte Kartendienste mit 3D-Bildmaterial</i>	++
	<i>Stadtbiotoptypen, Biotopkartierungen</i>	++
	<i>Statistische Daten Einwohnerdichte</i>	+
	<i>Boden- und Landnutzungsdaten (z. B. CORINE Land Cover)</i>	+
Informationen Gewässer / Gräben	<i>Bestandsdaten Gewässerbauwerke (ALKIS®): Durchlässe, Einbauten, Hochwasserschutzanlagen</i>	++++
	<i>Bestandsdaten: Längs- und Querprofile</i>	++
	<i>Hydraulische Kenndaten: Bordvollabflüsse, Wasserspiegellagen, HQx-Linien</i>	+
Legende: (++++) <i>essenziell: methodisch zwingend erforderlich, nicht gleichwertig ersetzbar</i>		
(+++) <i> vorrangig: methodisch dringend erforderlich, mit maßgeblichem Ergebniseinfluss</i>		
(++) <i>optional: methodisch nicht zwingend erforderlich, jedoch ergebnisverbessernd</i>		
(+) <i>nachrangig: geringe methodische Relevanz, ersatzweise für optionale Daten</i>		

Informationen zu Grundstücksteilflächen unterschiedlicher Nutzung und Beschaffenheit (Wege- Hof- oder Grünflächen), wie sie beispielsweise in den Versiegelungskatastern der Kommunen zur gesplitteten Abwassergebühr vorliegen, erlauben eine differenziertere Bewertung des Schadenspotenzials auf Flurstücksflächen und sollten, sofern verfügbar, als **vorrangige Daten** mit genutzt werden. Gegenüber Orthophotos, die diese Flächendifferenzierung ebenfalls und sogar bei noch höherem Detaillierungsgrad ermöglichen, liegt der höhere Nutzwert in der besseren GIS-Verarbeitung, da die Teilflächen vektorisiert vorliegen.

Die über Biotopkartierungen erfassten „Stadtbiototypen“ (siehe Abschnitt 2.5.6.1) können als **optionale Daten** zur weiteren Differenzierung von Gebäude- oder Flächennutzungen herangezogen werden. In Einzelfällen lassen sich daraus ergänzende Indizien für mögliche Schadensanfälligkeiten für Starkregenüberflutungen ableiten, beispielsweise, sofern darin ein besonderes Schutzbedürfnis städtischer Vegetationsflächen ausgewiesen ist oder anhand der Biototypbeschreibung von Bebauung (siehe Tabelle 6-10, Seite 184). Die Boden- und Landnutzungsdaten (CORINE) erreichen aufgrund ihrer groben räumlichen und inhaltlichen Untergliederung (Nomenklatur) nicht die Informationsgüte der ALKIS®-Nutzungsdaten und lassen sich nur nachrangig, d. h. ersatzweise und unter Aussageverlusten in die Schadenspotenzialabschätzung der Siedlungsflächen einbinden. Die gleiche Einschätzung gilt für die Implementierung von Informationen zu Einwohnerdichten. Es wird dabei ein grundsätzlicher Zusammenhang unterstellt zwischen Siedlungsdichte und einer entsprechenden Akkumulation von Schadensobjekten und Sachwerten, aber natürlich auch von potenziell überflutungsgefährdeten Personen. Über das Einwohnermeldewesen der Kommunen liegen entsprechende Informationen gebäudescharf zwar vor. Sie unterliegen jedoch hinsichtlich einer Verwendung auch dem Datenschutz, sodass oftmals nur auf Block-, Quartiers- oder Stadtbezirksebene aggregierte Einwohnerdichten verwertet werden können. Der Informationsmehrwert dieses Indikators gegenüber der Gebäudenutzung ist somit nicht einheitlich gegeben.

Die in Tabelle 6-1 aufgeführten Informationen zu Fließgewässern und Gräben werden bei der Indikation neuralgischer Punkte mit signifikant erhöhtem Überflutungsrisiko, wie verklausungsanfällige Durchlässe oder Gewässereinbauten bedeutsam. Die entsprechenden Bestandsdaten sind ebenfalls in ALKIS® geführt. Ergänzend können nach Verfügbarkeit auch Gewässerquer- und Längsprofile in die Bewertung einbezogen werden.

6.1.2 Auswertung der ALKIS®-Datengrundlage

Aufgrund der hervorgehobenen Bedeutung der amtlichen Liegenschaftsinformationen (ALKIS®) für die Bewertung von Schadenspotenzialen für Starkregenüberflutungen wird diese Datengrundlage vorliegend näher hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten untersucht. Wie in Abschnitt 2.5.5.1 beschrieben, lassen sich aus der Gesamtheit des ALKIS®-Objektartenkatalogs (ALKIS®-OK) verschiedene Objektwerte-

arten (OWA) identifizieren, mit denen sich Indikatoren der Schadenspotenziale bei Starkregenüberflutungen beschreiben lassen (siehe Tabelle 4-3, Seite 97). Im Wesentlichen sind dies Objektwertarten zur tatsächlichen Nutzung von Gebäuden und Flurstücksflächen, aber auch zur Bauweise oder Charakteristik von Gebäuden.

Vorliegend wird eine systematische Auswertung der im ALKIS®-OK gemäß GeoInfoDok, Version 7.0.1 (AdV 2015d) aufgelisteten Objektwertarten (OWA) durchgeführt. Dabei werden zunächst 1.819 OWA datenbankgestützt zur näheren Auswertung erfasst⁸. Nach erster Sichtung werden ca. 1.500 Datensätze vorausgewählt, die als potenziell relevant einzustufen sind. Dis ist dann der Fall, wenn sich die in der Objektart hinterlegte Information hinsichtlich der Aufgabenstellung der Gefährdungs- und Risikoanalyse verwerten lässt, wie es beispielsweise bei Informationen zur Oberflächenbeschaffenheit oder Nutzung gegeben ist. In einer zweiten Sichtungsphase wird diese Auswahl bezüglich ihrer Eignung zur Indikatorbeschreibung für das Schadenspotenzial bei Überflutungen überprüft. Dabei ist zu bewerten, ob und wie treffend eine ALKIS®-OWA in der nachfolgenden Schadenpotenzialanalyse quantifizierbar bzw. klassifizierbar ist. Es verbleiben nach dieser Prüfung insgesamt 1.139 Objektwertarten, die in die indikatorbasierte Schadenpotenzialanalyse einbezogen werden können. Diese Auswahl erstreckt sich über 55 Objektarten und 38 Attributarten (vgl. Abbildung 6-1).

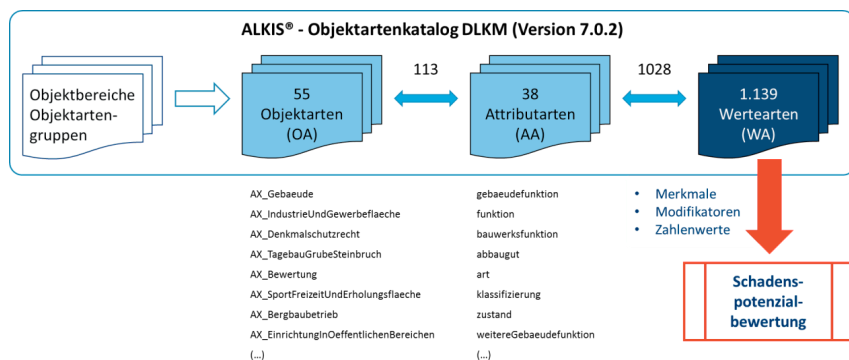


Abbildung 6-1: Auswertesystematik zur Identifikation möglicher Schadenspotenzialindikatoren des ALKIS®-OK (eigene Darstellung)

⁸ Im Zuge der Datenbankerfassung wurden Objektart (OA), Attributart (AA) und Wertart (WA) zu „Objektwertarten“ (OWA) zusammengefasst und nach der Syntax OA-AA-WA eindeutig codiert (z. B. „42006-FKT-5250“ als Kombination „Weg“ – „Funktion“ – „Rad- und Fußweg“).

Für die weitere Verwendung dieser Auswahl gilt jedoch als wichtige Einschränkung, dass der über den Grunddatenbestand des ALKIS®-OK hinaus gehende Erfassungsgrad der Liegenschaftsinformationen in den Bundesländern deutliche Unterschiede aufweist, weil der Datenmigration zu ALKIS® landesspezifisch verschiedene ALK- und ALB-Bestände zugrunde gelegt wurden. Eine Auswertung der AdV-Auflistung der länderspezifischen ALKIS®-Inhalte (AdV 2015a) bestätigt dies: In Abbildung 6-2 ist je Bundesland die Anzahl der ausgewählten Objektwertarten dargestellt, die in (AdV 2015a) mit dem Status „wird eingeführt oder ist eingeführt“ markiert sind. Die Erfassungsgrade liegen mit 948 Objektwertarten in Mecklenburg-Vorpommern (MV) bei über 80%, während für Sachsen (SN) mit 33 Objektwertarten ein nur geringfügig erweiterter Grunddatenbestand zur Verfügung steht. Es sei ergänzend dazu erwähnt, diese Erfassungsgrade einerseits als Zwischenstände anzusehen sind; bspw. hat Bayern noch die Einführung und Erfassung weiterer OWA vorgesehen. Andererseits überlässt Nordrhein-Westfalen für einen erheblichen Teil der Objektarten den Kommunen selbst die Entscheidung darüber, welche Objektwertarten geführt und erfasst werden. Insofern existiert in Deutschland keine einheitliche Qualität der ALKIS®-Datengrundlage für Fragestellungen der Schadenspotenzialanalyse, was sich anwendungsfallbezogen auch auf deren methodische Durchführung auswirkt.

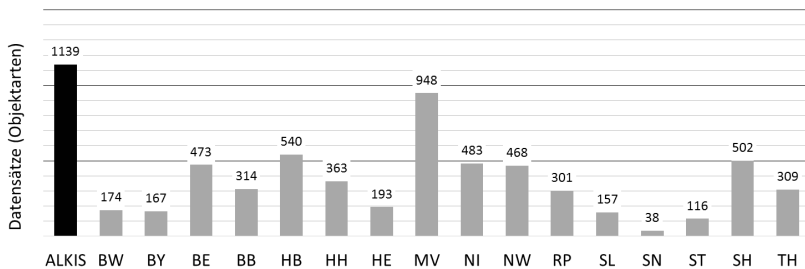


Abbildung 6-2: Erfassungsgrade möglicher Schadenspotenzialindikatoren des ALKIS®-OK im Ländervergleich, Datengrundlage: AdV (2015a) (eigene Darstellung)

Für die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird mit Bezug auf das Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied) auf die Datengrundlage von Rheinland-Pfalz mit insgesamt 301 Objektwertarten für Gebäude und Flurstücksflächen zurückgegriffen. Hinsichtlich der bewertungsrelevanten Informationen, die eine Objektwertart beinhaltet, wird zwischen verschiedenen Informationstypen unterschieden.

Die methodische Einbindung der Objektwertarten in die Schadenspotenzialanalyse anhand verschiedener Klassifizierungsansätze wird in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

Tabelle 6-2: Verschiedene Informationstypen von ALKIS®-Objektwertarten

Informationstyp	Beschreibung
<i>Merkmal</i>	<i>Dieser Informationstyp beschreibt eine funktionale Eigenschaft, die sich bezüglich der Objekteigenschaft, hier des Schadenspotenzials, unmittelbar und eigenständig bewerten lässt. Die Bewertung dient als Basiswert, der noch modifizierbar ist (OWA-Beispiel: 31001-GFK-3024 - „Forschungsinstitut“)</i>
<i>Modifikator</i>	<i>Dieser Informationstyp dient der Modifikation eines Merkmals, indem er dessen Klassifizierung ersetzt. Beispielsweise korrigiert die OWA 31001-ZUS-2100 („außer Betrieb, stillgelegt, verlassen“) den Klassenwert des Merkmals auf Klasse 0.</i>
<i>Faktor</i>	<i>Dieser Informationstyp kann nicht unabhängig von einem Merkmal zur Bewertung verwendet werden. Er modifiziert dieses durch einen Faktor bei der Klassifizierung. Beispielsweise reduziert die OWA 31001-ZUS-1000 („in behelfsmäßigem Zustand“) als Faktor den Klassenwert des Merkmals auf 50%.</i>
<i>Summand</i>	<i>Dieser Informationstyp kann nicht unabhängig von einem Merkmal zur Bewertung verwendet werden. Er modifiziert dieses durch einen absoluten Zu- oder Abschlag bei der Klassifizierung. Beispielsweise erhöht die OWA 31001-OFL-1200 „unter der Erdoberfläche“ die Klassifizierung um eine Klasse.</i>
<i>Zahlenwert</i>	<i>Dieser Informationstyp beinhaltet einen Zahlenwert, der über eine Zuordnungsfunktion in einen Modifikator, Summand oder Faktor des Bewertungsmerkmals zu transferieren ist, z. B. die Untergeschossanzahl (OWA 31001-AUG-0), sofern größer Null, als Summand (Zuschlag +1) oder das Baujahr eines Gebäudes (OWA 31001-BJA-0) als möglicher Anpassungsfaktor.</i>

Tabelle 6-3: Informationstypen der bewertungsrelevanten ALKIS®-Objektwertarten für Rheinland-Pfalz (OWA-RP)

Informationstyp	OWA (Objekt)	OWA (Fläche)	Gesamt
<i>Merkmal</i>	88	203	291
<i>Modifikator:</i>			
<i>Faktor</i>	6	1	7
<i>Summand</i>	3	0	3
<i>Zahlenwert</i>	0	0	0
Summe	97	204	301

6.2 Schadenspotenzialanalyse für Gebäude und Risikoobjekte

Der Ansatz der flächendeckenden Schadenspotenzialbewertung anhand pauschal klassifizierter Nutzungsarten von Gebäude- und Flurstücksflächen wird als Stand der Technik bereits beschrieben und angewendet (siehe Abschnitt 2.3.2.3). Allerdings sind sowohl die methodische Umsetzung des Indikators „Nutzungsart“ als auch dessen Bewertung selbst nicht näher definiert oder gar standardisiert, sodass dieser ergebnissensitive Arbeitsschritt – er wirkt sich unmittelbar auf die erzeugte Risikobewertung aus – in sehr hohem Maß von der subjektiven Einschätzung des Bearbeiters abhängt.

Die vorliegenden Untersuchungen zielen darauf ab, die Klassifizierungssubjektivität der pauschalen Schadenspotenzialbewertung einzugrenzen und die genannten Defizite dieses Teilprozesses zu reduzieren. Es werden drei methodische Ansätze zur Klassifizierung des Indikators Gebäudenutzung SGN, die zu einer jeweils besseren Objektivierung des Prozesses führen, vorgestellt und auf das Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied) angewendet. Da die Ansätze mit zunehmender Detaillierung aufeinander aufbauen, lassen sich im direkten Vergleich der Ergebnisse die jeweils vorangegangenen Methoden validieren.

6.2.1 Pauschale Schadenspotenzialbewertung (Ansatz 1)

Ansatz 1 beschreibt den Status quo der Schadenspotenzialbewertung anhand einer pauschalen Klassifizierung der Gebäudenutzungsart. Es ist zunächst über die Klassenanzahl der Grad der Differenzierung festzulegen. Die hierzu bereits bei der Gefahrenklassifizierung formulierten Überlegungen (Abschnitt 5.3.2) gelten ebenso für die Schadenspotenzialbewertung, sodass wenige, d. h. drei bis fünf Schadenspotenzialklassen auch hier angemessen sind. Allerdings sind die hier als Entscheidungs- und Bewertungsgrundlagen ausgewählten Indikatoren aufgrund der Komplexität der Schadensbewertung mit größeren Unsicherheiten behaftet als bei der Gefährdungsanalyse, sodass auch die Genauigkeitsansprüche an die Bewertung ggf. durch eine geringere Klassenanzahl anzupassen sind.

Vorliegend werden fünf Schadenspotenzialklassen (0 bis 4)⁹ verwendet, die sich analog zur Gefährdungsanalyse sprachlich von „sehr gering“ bis „sehr hoch“ erstrecken. Zusätzlich wird für Kritische Infrastrukturen die Schadenspotenzialklasse 5 geführt, um den Sonderstatus dieser Objekte und den obligatorischen Bedarf einer objektbezogenen Vulnerabilitätsbetrachtung zu markieren (Tabelle 6-4). Sensible Einrichtungen und Infrastrukturen werden ohne Sonderstatus geführt und bis maximal Schadenspotenzialklasse 4 eingestuft. In Ausnahmefällen können jedoch entsprechend bedeutsame Einrichtungen auch mit Schadenspotenzialklasse 5 geführt werden.

⁹ Die Klassenkennziffer 0 ist eine bewusste Festlegung, die Vorteile in der numerischen Verarbeitung bzw. Kartendarstellung bietet. Sie ist keinesfalls als „kein Schadenspotenzial“ zu interpretieren.

Tabelle 6-4: Vorschlag einer pauschalen Schadenspotenzialklassifizierung des Indikators Gebäudenutzung SGN

Schadenspotenzialklasse (Gebäudenutzung) SGN	Beschreibung
0	sehr gering
1	gering
2	mäßig
3	hoch
4	sehr hoch
5	Sonderstatus Kritische Infrastrukturen

Der Klassifizierungsschlüssel der pauschalen Schadenspotenzialbewertung basiert auf der Auswahl an ALKIS®-Objektwertarten (OWA), über die eine Beschreibung des Indikators Nutzungsart möglich ist (Abschnitt 6.1.2). Aus dem für Rheinland-Pfalz hierfür identifizierten Datenbestand von 301 OWA sind dies 88 OWA, die klassifizierungsrelevante Merkmale der Gebäudenutzung beschreiben und die nachfolgend als „OWA-RP“ bezeichnet werden.

Die Methodik selbst umfasst zwei wesentliche Aspekte der Pauschalierung, die der Erläuterung bedürfen und die bei der Anwendung zu beachten sind:

- Keine Differenzierung nach Vulnerabilitätsdimensionen und Schadensarten
- Vernachlässigung spezifischer Objekteigenschaften

Die pauschale Zuweisung der Schadenspotenzialklasse zur Objektwertart (OWA), die die Nutzungsart beschreibt, erfolgt **ohne Differenzierung nach verschiedenen Vulnerabilitätsdimensionen, Schadensarten und -ausprägungen**. Demnach können ein Gebäude, in dem ein großer, u. U. mobilitätseingeschränkter Personenkreis einer Überflutungsgefährdung ausgesetzt ist (z. B. Senioren- oder Pflegeheim, Kindertagesstätte) und eine Industrieliegenschaft, von der bei Überflutung ein signifikantes Umwelttrisiko durch Kontamination von Gewässer und Boden ausgeht, eine gleich hohe Schadenspotenzialklasse aufweisen. Daraus lässt sich für beide Beispielobjekte in Konsequenz ein gleich hohes Schutzbedürfnis bei entsprechender Überflutungsgefährdung ableiten.

Dieser Ansatz der Schadenspotenzialbewertung liefert über den Klassenwert auch eine Information darüber, wie der Bearbeiter gefährdungsunabhängig das „Schutzbedürfnis“ eines Gebäudes im Sinne einer Notwendigkeit der Schadensvermeidung oder -minderung eingestuft hat. Bei der Durchführung der pauschalen Klassifizierung sollte diese alternative Fragestellung nach dem Bedarf einer grundsätzlichen Schadensvermeidung mit in die Bewertung einbezogen werden. Denn es nicht zwingend davon auszugehen, dass beide Leitfragen zu identischen Klassifizierungsergebnissen führen.

Die Festlegung des Schadenspotenzials für eine Nutzungsart (ALKIS®-OWA) erfolgt ferner pauschal, d. h. ohne Unterscheidung nach **unterschiedlichen Objekteigenschaften**. Die „Höhe“ des Schadenspotenzials bezeichnet qualitativ, wie in Abschnitt 4.3.1 dargelegt, den oberen Grenzwert aller möglichen Schäden innerhalb eines Ereignis- und Gefahrenspektrums bezogen auf ein Einzelobjekt. Dieser wird durch einen repräsentativen Klassenwert ausgedrückt. Tatsächlich ist jedoch innerhalb einer Nutzungsart eine breite Vielfalt an Einzelobjekten vorhanden, deren Schadenspotenziale aufgrund objektspezifischer Eigenschaften und Details entsprechend stark streuen können und die zu Bewertungsunsicherheiten führen.

Diese resultieren beispielsweise

- aus der Größenabhängigkeit des Schadenspotenzials (höheres potenzielles Ausmaß an Sach- und Inventarschäden bei größeren Gebäuden),
- aus zeitlich veränderlichen oder temporären Nutzungen (wechselnder Publikumsverkehr bei öffentlichen Gebäuden, Frequentierung von Kultur- und Sportstätten, Veranstaltungsräumen, Parkräumen, etc.)
- aus zu großer Verallgemeinerung der Nutzungsinformation (Überbegriffe und allgemeine Titelpositionen) bzw. zu unspezifischer Nutzungsbeschreibung (z. B. „Gebäude für öffentliche Zwecke“)

Die genannten Unsicherheiten sind bei der Klassifizierung angemessen, d. h. durch fallspezifische Festlegung zu berücksichtigen. Während bei zu unspezifischer Nutzungsinformation der Bewertung ein repräsentatives, „charakteristisches“ bzw. „mittleres“ Schadenspotenzial zugrunde gelegt werden sollte, ist bei zeitlich veränderlichen oder temporären Nutzungen zu differenzieren: Liegen gesicherte Informationen beispielsweise zu Aufenthaltshäufigkeiten und -dauern von Personen in überflutungsgefährdeten Gebäuden aufgrund der Nutzung vor¹⁰, so sollten diese „Nutzungswahrscheinlichkeiten“ in die Bewertung einbezogen werden. Ansonsten wird empfohlen, die Klassifizierung im Sinne einer Worst-Case-Bewertung vorzunehmen. Dazu ist jedoch zu beachten, dass bei einer kategorischen Worst-Case-Bewertung aller Nutzungsarten die Gefahr besteht, dass einzelne Schadenspotenziale zu stark überzeichnet werden und somit die erwünschte Differenzierung und Aussagekraft des Gesamtergebnisses eingeschränkt werden.

Bei dem vorliegenden Ansatz 1 werden in Erweiterung der etablierten Schadenspotenzialbewertung die Bewertungsunsicherheiten methodisch stärker berücksichtigt. Neben der Klassenzuweisung als Annahmewert des Schadenspotenzials werden dazu fünf verschiedene Qualitätskategorien (A bis E) eingeführt. Anhand dieser wird bewertet, wie gut der Indikator Gebäudenutzung das Schadenspotenzial anhand der jeweilige Objektwertart qualitativ beschreibt (Tabelle 6-5). In diesem Zuge erfolgt auch eine Beurteilung darüber, in welchem Ausmaß die Objektcharakteristika und

¹⁰ Zur Auswertung können beispielsweise Belegungs- und Veranstaltungspläne von Versammlungs- und Sportstätten, aber auch Arbeits-, Öffnungs- und Dienstzeiten von Produktions-, Gewerbe-, Dienstleistungs- oder Verwaltungsobjekten herangezogen werden.

Bewertungsunsicherheiten bei einer OWA streuen. Die in der Tabelle gelistete fünfte Kategorie E dient nur der Komplettierung, wird jedoch aufgrund der ungenügenden Bewertungsrelevanz nicht bei den entsprechend vorausgewählten OWA vergeben. Umgekehrt ist darauf hinzuweisen, dass selbst bei einer sehr guten Indikatoreignung (Kategorie A) Bewertungsunsicherheiten hinsichtlich des Schadenspotenzials verbleiben.

Auch wenn bei der pauschalen Schadenspotenzialbewertung nicht nach Schadensarten differenziert wird, so basiert die Bewertung dennoch auf verschiedenen Einzelbeurteilungen, z. B. ob und in welchem Umfang Personenschäden oder Sachschäden möglich sind. Die Anwendung der Qualitätskategorien auf die einzelnen OWA zeigt, dass dabei ebenfalls zwischen Personenschäden und nutzungsbezogenen Sachschäden zu differenzieren ist. Das Beispiel der OWA „Heilanstalt, Pflegeanstalt, Pflegestation“ (31001-GFK-3052) soll dies verdeutlichen: Das Schadenspotenzial dieser Gebäudeart wird anhand des Indikators „Gebäudenutzung“ als „sehr hoch“ (Klasse 4) eingestuft. Die Einschätzung, dass bei Starkregenüberflutungen eine größere Anzahl von zumeist mobilitätseingeschränkten, hilfsbedürftigen Personen sowie größere Sachwerte (z. B. hochwertiges, medizinisches Inventar) gefährdet sein können, ist für diese Klassifizierung maßgeblich. Dabei wird der Beurteilung potenzieller Personenschäden ein sehr hohes Vertrauensmaß (Kategorie A) attestiert, wohingegen die Beurteilung der hohen Sachwerte als etwas unsicherer und „durchschnittlich genau“ (Kategorie C) angesehen wird.

Tabelle 6-5: Qualitätskategorien von OWA zur Beschreibung des Schadenspotenzialindikators Gebäudenutzung

Kategorie	Indikatoreignung	Zusammenhang OWA-Information - Indikator	Streuung der Charakteristika	Bewertungsgüte (Vertrauensmaß)
A	sehr gut	eindeutig erkennbar	kaum	sehr hoch / sehr zuverlässig
B	gut	gut erkennbar	gering	hoch / zuverlässig
C	mäßig	tendenziell erkennbar	mittel	moderat / zufriedenstellend
D	schlecht	schwach erkennbar	hoch	gering / unzuverlässig
E	ungeeignet	nicht erkennbar / nicht vorhanden	sehr hoch / zu hoch	ungenügend

Tabelle 6-6 veranschaulicht, wie sich die Beurteilung der Bewertungsqualität auf die jeweiligen Schadenspotenzialklassen der OWA von Rheinland-Pfalz (OWA-RP), getrennt nach Personenschäden und nutzungsbezogenen Schäden, verteilen. Zur besseren visuellen Bewertung sind die Felder darin entsprechend ihrer Häufigkeit unterschiedlich eingefärbt.

Tabelle 6-6: Absolute Häufigkeiten der Qualitätskategorien (A bis D) der OWA-RP je Schadenspotenzialklasse zur Beschreibung des Indikators Gebäudenutzung SGN

	A	B	C	D	Anzahl
Klasse 0	1	1	0	0	2
Klasse 1	10	2	0	0	12
Klasse 2	0	5	6	0	11
Klasse 3	2	18	10	1	31
Klasse 4	5	4	4	0	13
Klasse 5	11	5	3	0	19
Anzahl	29	35	23	1	88

(a) Personenschäden

	A	B	C	D	Anzahl
Klasse 0	1	1	0	0	2
Klasse 1	5	6	1	0	12
Klasse 2	0	5	6	0	11
Klasse 3	0	17	11	3	31
Klasse 4	1	8	4	0	13
Klasse 5	4	9	4	2	19
Anzahl	11	46	26	5	88

(b) Nutzungsbezogene Schäden

Die Eignung des Indikators Gebäudenutzung SGN wird nach dieser Auswertung hinsichtlich der Abschätzung potenzieller Personenschäden insgesamt höher bewertet als für nutzungsbezogene Schäden, was sich damit begründen lässt, dass diese Schadensfraktion allgemein unspezifischer und vielfältiger ist und damit schwieriger bewertbar. Es zeigt sich zudem, dass eine sehr gute Indikatoreignung (Kategorie A) vor allem bei eindeutiger Schadenspotenzialbewertung in den Randklassen (sehr gering, sehr hoch) gesehen wird. Umgekehrt nehmen die Unsicherheiten in der Bewertung bei mittleren Schadenspotenzialen zu.

Die Anwendungsergebnisse des Klassifikationsansatzes 1 auf das Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied) sind in Abbildung 6-3 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass aufgrund der Verteilungen der Nutzungsarten im Untersuchungsgebiet Neuwied der überwiegende Anteil der Gebäude nur mit einem geringen bzw. mittleren Schadenspotenzial bewertet ist. Es handelt sich dabei nahezu ausschließlich um Garagen (Klasse 1) und Wohngebäude (Klasse 2), die mit den entsprechend großen Anteilen im Projektgebiet vorhanden sind. Der Anteil an Gebäudenutzungen mit hohem Schadenspotenzial beträgt ca. 10 %, die weitestgehend aus der Nutzungsart „Gebäude für Wirtschaft oder Gewerbe“ bestehen. Ein sehr hohes Schadenspotenzial wird für 132 Gebäude ausgewiesen und insgesamt 255 Gebäude sind mit dem Sonderstatus Kritische Infrastrukturen in Schadenspotenzialklasse 5 geführt. Für die Kartendarstellung ist eine solche Häufigkeitsverteilung vorteilhaft, da die hohen Schadenspotenzialklassen nur mit einer begrenzten Objektanzahl vertreten sind, womit potenzielle Risikobereiche gut lokalisiert und pointiert dargestellt werden können. Da Wohngebäude und Nebengebäude, wie Garagen, allgemein den zahlenmäßig größten Gebäudebestand eines Siedlungsgebiets darstellen, findet sich die im Beispiel Neuwied erkennbare Dominanz der Klassen 2 und 3 im Wesentlichen auch in anderen Untersuchungsgebieten wieder, wie der Vergleich mit den Untersuchungsgebieten Saarbrücken (Schmitt und Scheid 2014) und Hamburg (RISA 2014) bestätigt (hier nicht näher dokumentiert).

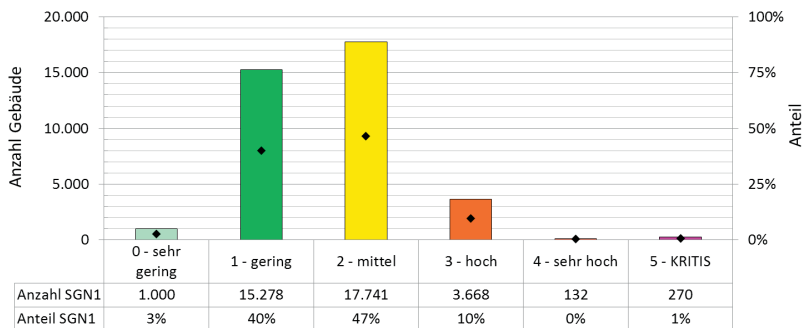


Abbildung 6-3: Schadenspotenzialklassifizierung des Indikators Gebäudenutzung SGN nach Ansatz 1, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)

6.2.2 Schadenspotenzialbewertung nach Vulnerabilitätsdimensionen (Ansatz 2)

Ansatz 2 erweitert die pauschale Schadenspotenzialbewertung nach Ansatz 1, indem bei der Klassifizierung differenziert wird nach den verschiedenen Vulnerabilitäts- und Schadensdimensionen (siehe Tabelle 4-3, Seite 97). Er liefert somit für die einzelnen OWA insgesamt fünf dimensionsbezogene Schadenspotenziale für

- physische Schäden (human) SGN_{PH}
- physische Schäden (nicht-human, materiell) SGN_{PM}
- soziokulturelle Schäden SGN_{SK}
- ökonomische Schäden SGN_W
- ökologische Schäden SGN_U .

Die Klassifizierung selbst erfolgt wie bereits bei Ansatz 1 als Einteilung in 6 Klassen (siehe Tabelle 6-4). Zur weiteren Ergebnisverarbeitung können in Analogie zu Ansatz 1 die fünf Schadenspotenziale zu einem resultierenden Schadenspotenzial SGN_2 zusammengefasst bzw. kombiniert werden. Da sich in Überlagerung mit der Gefährdung ein hohes Überflutungsrisiko bereits dann einstellt, wenn nur eines der bewerteten Schadenspotenziale hoch klassifiziert ist, ist die Maximumbildung nach Gleichung (8) als Überlagerungsregel anzuwenden. Ergänzend kann durch Summation der fünf Klassenwerte ein Kennwert ΣSGN_2 nach Gleichung (9) generiert werden, der für das gesamte Schadenspotenzial steht (Abbildung 6-4).

$$SGN_2 = \max(SGN_{PH}; SGN_{PM}; SGN_{SK}; SGN_W; SGN_U) \quad (8)$$

$$\sum SGN_2 = \sum_k w_k \cdot SGN_k; \quad k \in \{PH; PM; SK; W; U\} \quad (9)$$

mit: w_k = Wichtungsfaktor der Vulnerabilitätsdimension k (≥ 1)
 SGN_k = Schadenspotenzialklasse der Vulnerabilitätsdimension k

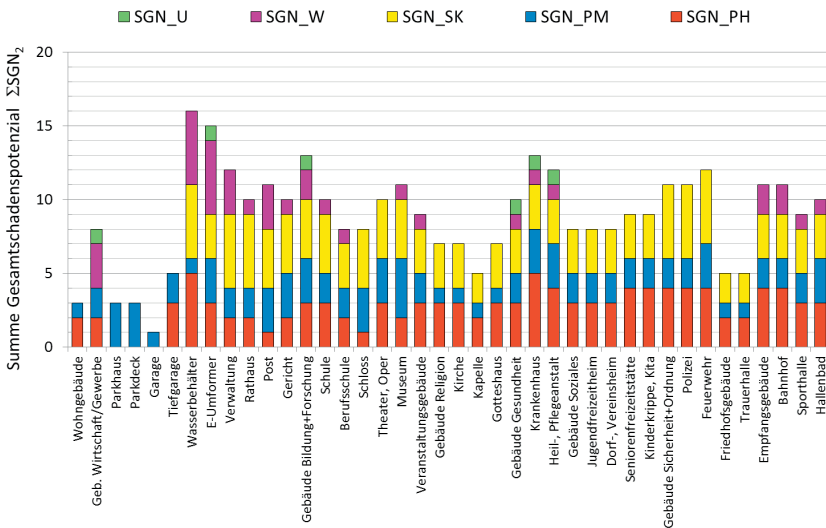


Abbildung 6-4: Summenwerte des Gesamtschadenspotenzials ΣSGN_2 nach differenzierter Klassifizierung des Indikators Gebäudenutzung anhand verschiedener Vulnerabilitätsdimensionen, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)

Durch die jeweilige Fokussierung auf die fünf genannten Vulnerabilitätsdimensionen bewegt sich der Bearbeitende mit dem Bewertungsansatz 2 in einem engeren und damit weniger komplexen inhaltlichen Entscheidungsfeld, was die Klassifizierung erleichtert und deren Unsicherheiten eingrenzt. Gleichzeitig liegt mit diesem Ansatz ein differenzierteres Gesamtbild der Schadenspotenzialanalyse vor, das auch in entsprechenden Einzelkarten bereitgestellt werden sollte (vgl. Abschnitt 6.3).

So kann es im Rahmen des Risikomanagements bei der zielgruppenbezogenen Kommunikation mit unterschiedlichen Akteuren hilfreich sein, sich zur Konzeption von Vorsorgemaßnahmen nur auf bestimmte Schadenspotenziale zu fokussieren. Beispielsweise gilt es, bei signifikanten Risiken für Personenschäden („Leib und Leben“), die auf Grundlage des Schadenspotenzialindikators SG_{PH} identifiziert werden, möglichst umgehend Schutz- und Vorsorgemaßnahmen zu ergreifen. Über den zusätzlichen Summenwert des Schadenspotenzials kann eine Rangfolge erstellt werden, die die Priorisierung von Vorsorgemaßnahmen erleichtert und unterstützt.

Die Anwendungsergebnisse dieses Ansatzes auf das Untersuchungsgebiet Neuwied sind für alle OWA und Schadenspotenzialdimensionen tabellarisch in Anhang A-6, Tabelle A-2 dokumentiert. Darüber hinaus wurden die Klassifizierungsergebnisse der Ansätze 1 und 2 miteinander verglichen. Von den insgesamt 40 Objektwertarten, die im Untersuchungsgebiet Neuwied vorliegen, werden 15 OWA gegenüber Ansatz 1 (Abschnitt 6.2.1) abweichend, meist um eine Klasse höher bewertet. Dies bestätigt, wenn auch nur auf Grundlage einer einzelnen Bewertung, den Einfluss des stärkeren Differenzierungsgrades auf das Gesamtergebnis.

Bezüglich der Ergebnisvisualisierung bleibt anzumerken, dass sich die Gesamtschadenspotenziale ΣSG_{N_2} beispielsweise als Balkendarstellung (siehe Abbildung 6-4) nicht adäquat in einer Schadenspotenzialkarte umsetzen lassen. Es sollte daher eine parallele Nutzung getrennter Karten für die unterschiedlichen Vulnerabilitätsdimensionen vorgesehen werden.

6.2.3 Schadenspotenzialbewertung anhand charakteristischer Schadens-typen (Ansatz 3)

Der dritte vorgestellte Ansatz geht bezüglich der Differenzierung des Schadenspotenzials noch einen Schritt weiter als Ansatz 2. Hier erfolgt die Schadenspotenzialbewertung ebenfalls getrennt nach Vulnerabilitätsdimensionen, jedoch auf Grundlage einer Zuordnung charakteristischer bzw. für die Gebäudenutzung typischer Schadensbilder. Diese „Schadens-typen“ bedürfen zunächst einer näheren Erläuterung. Der Begriff wird hier in Abgrenzung zu den in Abschnitt 2.1.3.2 beschriebenen Schadensarten und im ausschließlichen Anwendungskontext zu der hier beschriebenen Methode verwendet. Er ist als Überbegriff für ähnliche, auf vergleichbare Objekte und Objektkategorien einwirkende Schäden zu verstehen, beispielsweise Schäden an mobilem Inventar in Privateigentum oder Gesundheitsschäden von Personen. Die Methodik dieses Ansatzes ist in Abbildung 6-5 dargestellt und wird nachfolgend beschrieben.

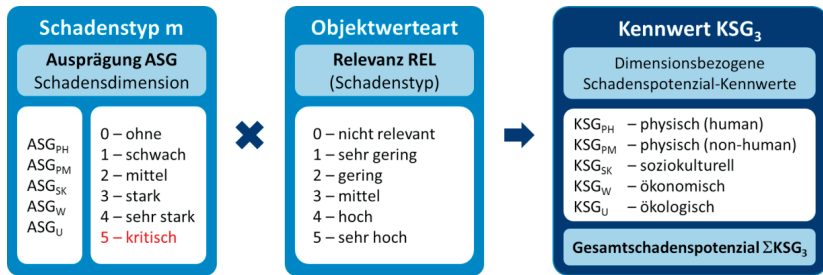


Abbildung 6-5: Methodik der differenzierten Schadenspotenzialbewertung des Indikators Gebäudenutzung (SGN₃) anhand charakteristischer Schadenstypen (Ansatz 3)

Zunächst wurde ein Katalog an Schadenstypen, die bei einer urbanen Starkregenüberflutung oder Sturzflut typischerweise auftreten können, erstellt. Dieser bildet den ersten Teil der Bewertungsgrundlage und umfasst insgesamt 25 Schadenstypen, die sich in Schäden an „Leib und Leben“, Gebäudeschäden, Inventarschäden und Schäden an Kritischen Infrastrukturen und deren Komponenten zusammensetzen (siehe Tabelle 6-7).

Jedem Schadenstyp lassen sich die fünf Vulnerabilitäts- oder Schadensdimensionen (vgl. Abschnitt 6.2.2) mit unterschiedlich starker Ausprägung ASG zuordnen, wobei die Ausprägungswerte von „0“ (ohne Ausprägung) bis „4“ (sehr starke Ausprägung) reichen, ergänzt um die Ausprägung „kritisch“, die für den eindeutigen Bezug auf Kritische Infrastrukturen verwendet wird. Die Komplettübersicht dieser Zuordnung ist in Anhang A-6, Tabelle A-3 dokumentiert.

Tabelle 6-7: Katalog von Schadenstypen für Gebäude und Bauwerke, Ansatz 3

Leib und Leben		Inventar	Kritische Infrastrukturen
LIF	Verlust von Menschenleben	IMP Inventarschäden, mobil, private Nutzung	KEG Schäden Sektor Energie
GSH	Gesundheitsschäden	IIP Inventarschäden, immobil, private Nutzung	KIT Schäden Sektor IT
		IMK Inventarschäden, mobil, sozio-kulturelle Nutzung	KVK Schäden Verkehr
		IIK Inventarschäden, immobil, sozio-kulturelle Nutzung	KVL Schäden Logistik
		IMG Inventarschäden, mobil, betriebliche Nutzung	KGM Schäden Sektor Gesundheit
		IIG Inventarschäden, immobil, betriebliche Nutzung	KWV Schäden Wasserversorgung
Gebäude/Objekt			KAW Schäden Abwasser
BWA	Gebäudeschäden (allgemein, privat)		KEL Schäden Sektor Ernährung
BWK	Gebäudeschäden (historische Objekte)		KFB Schäden Sektor Finanzen
BWG	Gebäudeschäden (betrieblich, gewerblich)		KSV Schäden Verwaltung
			KSS Schäden Sicherheit
			KSR Schäden Notfall-Rettung
			KMM Schäden Medien
			KMK Schäden Kulturgüter

Im zweiten Schritt der Bewertung werden den Objektwertarten (OWA) der Gebäudenutzung die jeweiligen Schadenstypen zugewiesen und festgelegt, mit welcher Relevanz REL bzgl. des Schadenseintritts der jeweilige Schadenstyp m bei einer OWA zu erwarten ist. Die Bewertungsspanne dieses Relevanzwertes liegt zwischen „0“ (nicht relevant), für Schadenstypen, die in der Regel nicht vorkommen, und „5“ (sehr hoch) für ausgesprochen typische, häufige Schadenstypen. Details hierzu sind Anhang A-6, Tabelle A-4 dokumentiert.

Die Zahlenwerte für die Ausprägung der Schadensdimension ASG und die Relevanz REL des Schadenstyps werden je Schadensbild multipliziert und getrennt nach Vulnerabilitätsdimensionen addiert, siehe Gleichung (10).

Daraus ergeben sich für jede OWA fünf dimensionsbezogene Schadenspotenzial-Kennwerte (KSG_{PH} , KSG_{PM} , KSG_{SK} , KSG_W und KSG_U). Diese werden die gemäß Gleichung (11) zu einem **Kennwert des Gesamtschadenspotenzials** ΣKSG_3 zusammengefasst. Hierzu ist es erforderlich, die relative Bedeutung der fünf Schadensdimensionen bezüglich einer sachgerechten Bewertung des Überflutungsrisikos und der daraus abzuleitenden Vorsorgemaßnahmen zu bewerten und über einen Wichtungsfaktor w_k zu berücksichtigen. So wird der Schutz von „Leib und Leben“ im Allgemeinen wichtiger als andere Schutzbedarfe erachtet und damit SGN_{PH} entsprechend stärker gewichtet.

$$KSG_k = \sum_m REL_{m,OWA} \cdot ASG_{k,m} \quad (10)$$

$$\sum KSG_3 = \sum_k w_k \cdot KSG_k \quad (11)$$

- mit: k = Vulnerabilitätsdimension; $k \in \{PH; PM; SK; W; U\}$
 m = Schadenstyp gemäß Tabelle 6-7
 $REL_{m,OWA}$ = Relevanz des Schadenstyps m für OWA
 $ASG_{k,m}$ = Ausprägung der Vulnerabilitätsdimension k für Schadenstyp m
 KSG_k = Schadenspotenzial-Kennwert der Vulnerabilitätsdimension k
 w_k = Wichtungsfaktor der Vulnerabilitätsdimension k (≤ 1)

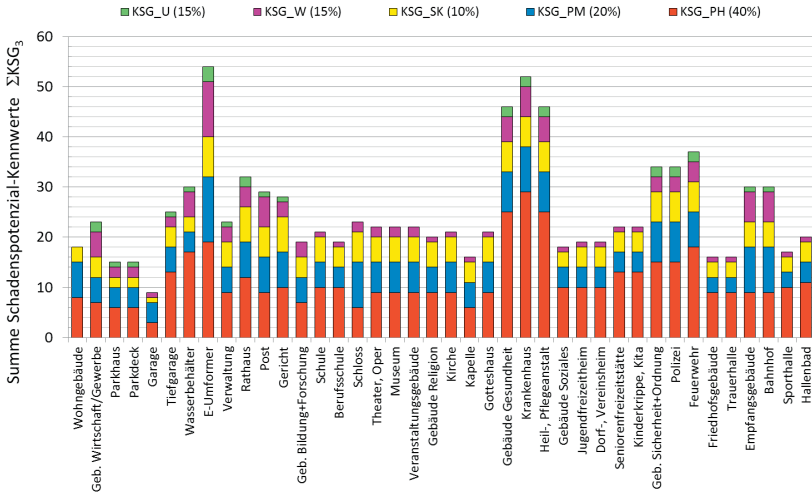


Abbildung 6-6: Kennwerte des Gesamtschadenspotenzials ΣKSG_3 gemäß Ansatz 3 für unterschiedliche OWA, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)

Abbildung 6-6 dokumentiert die Anwendungsergebnisse für das Untersuchungsgebiet 3. Darin sind für die vertretenen 40 OWA die Gesamtschadenspotenziale ΣKSG_3 mit ihren Dimensionsanteilen dargestellt. Die sich dabei einstellende Relation zwischen den OWA bestätigt grob die Einschätzungen der pauschalen Schadenspotenzialbewertungen der Ansätze 1 bzw. 2, liefert jedoch ein wesentlich differenzierteres Informationsbild zu Verteilung und Gewichtung der Schadensdimensionen.

Dieses Ergebnis ist aus verschiedenen Gründen nicht unmittelbar mit denen der Ansätze 1 und 2 vergleichbar. Der Kennwert des Gesamtschadenspotenzials ΣKSG_3 stellt zunächst ein Summenwert dar, der sich aus der Gesamtheit der in Frage kommenden Schadenstypen ergibt und noch nicht klassifiziert ist. Hierzu sind die Schadenspotenzial-Kennwerte KSG (Wertebereich 0 bis 25) getrennt nach Einzelschaden und Vulnerabilitätsdimension in eine Schadenspotenzialklasse SGN gemäß Tabelle 6-4 (Klassenwerte 0 bis 5) zu überführen, wobei das jeweilige Maximum, der Schadenstyp mit der stärksten Ausprägung und größten Relevanz, die Klassifizierung bestimmt.

Das Resultat der Klassifizierung nach Ansatz 3 (Abbildung 6-7) kann als Vergleichsgrundlage mit den Ansätzen 1 und 2 verwendet werden. Die Ergebnisse dieses Bewertungsansatzes sowie der Vergleich mit den beiden Ansätzen 1 und 2 können Anhang A-6, Tabelle A-5 entnommen werden. Ebenso lassen sich darauf die Vorschläge des Ansatzes 2 zur Visualisierung und Kartendarstellung unmittelbar übertragen.

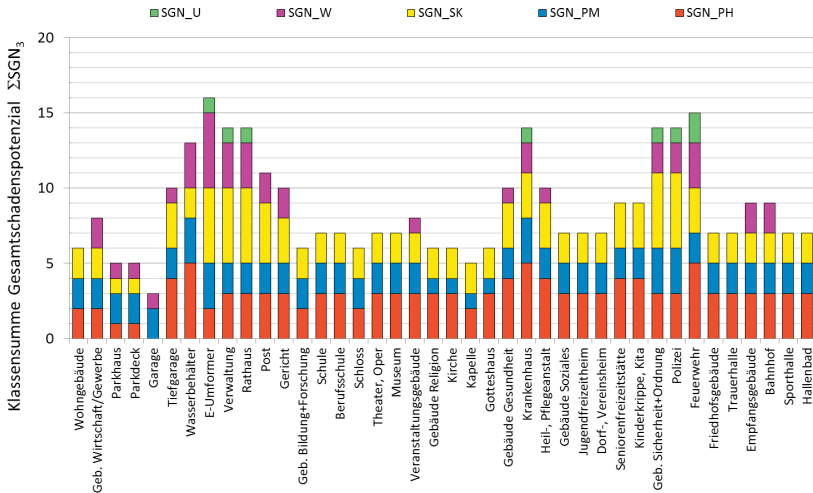


Abbildung 6-7: Summenwerte des Gesamtschadenspotenzials ΣSGN_3 nach differenzierter Klassifizierung des Indikators Gebäudenutzung anhand charakteristischer Schadenstypen, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)

6.2.4 Implementierung weiterer Gebäudeinformationen

6.2.4.1 Textinformationen zum Gebäudebestand

Neben den Informationen zur Gebäudenutzung sind in ALKIS® zusätzlich ergänzende Textinformationen zur näheren Objektidentifikation enthalten, wie sie beispielsweise aus Webkartendiensten bekannt sind. Hierzu führt ALKIS® unter der Objektart „AX_GEBAEUDE“ die Attributart „name“ (Attributkennung NAM), der wiederum in weiterer Untergliederung unter den Wertearten optionale Texteinträge zugewiesen sind. Diese Texteinträge ermöglichen die nähere Spezifikation einzelner Gebäude, wodurch sich auch Ansätze einer detaillierteren Schadenspotenzialbewertung ergeben (siehe Tabelle 6-8). Die Beispiele verdeutlichen die mögliche Diversität an Gebäudenutzungen innerhalb einer ALKIS®-Objektwertart. Die Textinformationen können genutzt werden, um eine vorgenommene pauschale Schadenspotenzialklassifizierung im Einzelfall durch Klassenzuschläge oder –abminderungen zu korrigieren. Solche Einzelfälle liegen beispielsweise vor, wenn das Verwaltungsgebäude einer karitativen Einrichtung mit Behindertenwohnheimen und –werkstätten nicht als „Gebäude für soziale Zwecke“, sondern eher als „Verwaltungsgebäude“ klassifiziert werden soll.

Tabelle 6-8: Beispiele für ergänzende Textinformationen der ALKIS®-Attributkennung NAM zu den Objektwertarten (OWA) der Gebäudenutzung

ALKIS®-OWA	Beispiele von Textinformationen (31001-NAM-0)
31001-GFK-3010: Verwaltungsgebäude	„Agentur für Arbeit“ „Amt für Jugend und Soziales“ „Kreisverwaltung“
31001-GFK-3050: Gebäude für Gesundheitswesen	„Rehabilitationszentrum für Körperbehinderte“ „Gesundheitsamt“ „Tierklinik“
31001-GFK-3060: Gebäude für soziale Zwecke	„Behindertenwerkstatt“ „Verwaltung“ „Pfleheim“

Dem bedeutenden Zugewinn an Informationen, zumindest für einen Teil der Gebäude, steht ein nicht unerheblicher Aufwand zur Verwertung der Textinformationen gegenüber. Es bedarf diverser GIS-gestützter Aufbereitungsschritte, u. a. für die Zusammenfassung mehrzeiliger Einträge, für Lagekorrekturen und Zuordnungen zu Gebäudepolygonen oder für Mehrfachzuweisungen. Ob der Implementierungsaufwand gerechtfertigt ist, muss fallspezifisch und anhand der angestrebten Aussagetiefe der Schadenspotenzialkarte entschieden werden. Entsprechende Nachjustierungen der Schadenspotenzialklassen für Einzelgebäude können und sollten durch ortskundige Nutzer des Kartenwerks vorgenommen werden. Diese Informationen können erst im Zuge der anschließenden Risikobewertung verwertet werden.

6.2.4.2 Überflutungsrelevante Gebäudedetails

Der ALKIS®-Objektartenkatalog beinhaltet noch weitere Objekt- oder Attributarten, die überflutungsrelevante Gebäudedetails und -eigenschaften beschreiben, z. B. die Bauweise, den Zustand oder die ober- bzw. unterirdische Geschossanzahl (siehe Tabelle 6-9). Allerdings werden diese Objektwertarten nicht obligatorisch von allen Bundesländern geführt und nicht flächendeckend erfasst. Eine Implementierung in eine gebietsweite Schadenspotenzialbewertung ist somit nur in Einzelfällen möglich.

Bei entsprechender Datenverfügbarkeit lassen sich diese Informationen als Modifikatoren, Summanden oder Faktoren der Schadenspotenzialklasse SGN (vgl. Abschnitt 6.1.2) verwenden. Tabelle 6-9 führt hierzu Beispiele an.

Darüber hinaus werden in ALKIS® überflutungsrelevante Bauteile, wie z. B. Kellereingänge, Lichtschächte, Treppen oder Rampen geführt, die eine etwas differenziertere Beurteilung vorhandener Gebäudeschwachstellen erlauben. Es ist jedoch anzuzweifeln, dass damit eine hinreichende Bewertung der Gebäudeanfälligkeit möglich wird, zumal diese zielführenderweise im Rahmen einer objektbezogenen Detailanalyse des Schadenspotenzials durch die Gebäudebesitzer und –verantwortlichen erfolgen sollte (Abschnitt 4.3.3.5).

Tabelle 6-9: Beispiele für ALKIS®-Inhalte mit überflutungsrelevanten Gebäudedetails

ALKIS®-Attributart	ALKIS®-Wertart (Inhalt)	Typus	Effekt (Beispiel)
anzahlDerOberirdischenGeschosse (AOG)		Z	Z > 3: SB = +1
anzahlDerUnterrirdischenGeschosse (AUG)		Z	Z > 0: SB = +1
Bauweise (BAW)	4000 - Offene Halle	M	SGN = 5
Beschaffenheit (BES)	1000 - Offene Gebäudelinie	F	SGN = 2-SGN
lageZurErdoberflaeche (OFL)	1200 - Unter der Erdoberfläche	S	SB = +2
	1400 - Aufgeständert	M	SGN = 1
Zustand (ZUS)	1000 - In behelfsmäßigem Zustand	F	SGN = 0,5-SGN
	2000 - In ungenutztem Zustand	M	SGN = 1
	2100 - Außer Betrieb, stillgelegt, verlassen	M	SGN = 0
	2200 - Verfallen, zerstört	M	SGN = 0
	2300 - Teilweise zerstört	M	SGN = 1

Legende: F (Faktor); M (Modifikator); S (Summand); Z (Zahl)

Neben den ALKIS®-Informationen lassen sich, sofern verfügbar, auch aus den Biotopkartierungen der Länder einzelne „Stadtbiototypen“ mit differenzierteren Hinweisen zu Gebäude- oder Flächennutzungen verwerten. Deren Beschreibungen gehen mitunter über die Aussagen der ALKIS®-Objektarten hinaus, beispielsweise zur Bebauungsstruktur, Gebäudesubstanz und deren Wertigkeit (siehe Beispiel Hamburg, Tabelle 6-10). Bei einer methodischen Implementierung in die Schadenspotenzialanalyse, beispielweise als Klassenzuschlag bei entsprechend hochwertiger Bauweise bzw. vermuteten hohen Sach- und Mobiliarwerten, ist sorgsam zu prüfen, ob die räumliche Ausdehnung dieser Biotope auf alle Gebäude übertragbar ist.

Tabelle 6-10: Beispiele für Stadtbiototypen mit differenzierten Nutzungsinformationen, Biotopkartierung Hamburg (nach Brandt und Engelschall 2011)

BB - Geschlossene Bebauung	BNN - Reihenhausbauung, verdichtet
BBA - Altstadt	BNO - Einzelhausbauung, verdichtet
BBG - Blockbauung der Gründerzeit	BNS - Stadtvillen
BBN - Blockbauung mit vielen Neubauten	BNV - Villenbauung
BBV - Dichte Bauung für Verwaltung u. Dienstleistung	BR - Blockrandbauung
BN - Einzel- und Reihenhausbauung	BRG - Blockrandbauung der Gründerzeit *)
BNA - Einzelanwesen und -gehöfte	BRM - Blockrandbauung der 20er und 30er Jahre
BNE - Lockere Einzelhausbauung	BRN - Neue Blockrandbauung
BNG - Reihenhausbauung	BRS - Stadthaus

*) Erläuterung Typ BRG: **Blockrandbauung der Gründerzeit:** „Blockrandbauung großbürgerlicher Mietshäuser (sog. "Schlitzbauten"), 4 - 6 geschossig, mit offenem, gut begrüntem Blockinnenraum. Entstehungszeit fast ausschließlich 1880 - 1914, Schwerpunkt: meist nach 1900 (Jugendstil). Nutzung: fast nur Wohnen. Gebietsweise (z.B. Eimsbüttel) kommen Blöcke mit der beschriebenen Randbauung vor, die im Innenraum aber kleine Schuppen aufweisen. Die Größe der Blöcke und damit der Innenräume ist unterschiedlich.“

6.3 Schadenspotenzialkarte

In der Schadenspotenzialkarte werden die nach Abschnitt 4.3.3.4 zusammengeführten Ergebnisse der Schadenspotenzialbewertung dargestellt. Mit der hier gewählten Methodik wird eine Unterteilung des Schadenspotenzials, vorrangig des Gebäudebestands, in insgesamt sechs Einzelklassen (Klassenwerte 0 bis 5) vorgenommen. Die höchste Klasse 5 markiert dabei Kritische Infrastrukturen oder wird aufgrund von Zuschlägen zugewiesen (vgl. Abschnitt 4.3.3.1). Wie in Abschnitt 6.3 ausgeführt, wird aufgrund der Bewertungsunsicherheiten eine differenzierte Schadenspotenzialbewertung nach Vulnerabilitätsdimensionen (Ansatz 3) empfohlen, die entsprechend auch im Kartenwerk visualisiert werden sollte (Abbildung 6-8).



Abbildung 6-8: Beispiele für Schadenspotenzialkarten für Gebäude, differenziert nach Vulnerabilitätsdimensionen (a-c) und als resultierendes Maximum (d), Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)

Die exemplarischen Darstellungen in Abbildung 6-8 (Teile a bis c) veranschaulichen sehr gut, dass damit für die weiteren Prozessschritte, u. a. die Risikokommunikation, zielgerichtete Mehrinformationen bereitgestellt werden können, auch im Vergleich zur standardmäßigen Darstellung des als Maximum zusammengefassten resultierenden Schadenspotenzials SG (Teil d der Abbildung). Diese ist für die weiterführende Überlagerung zur Risikodarstellung erforderlich.

Ähnlich wie bei der Gefahrenkarte sind auch hier mit der Unterteilung in sechs Klassen die darstellungstechnischen Möglichkeiten ausgeschöpft, sodass auf eine geeignete Farbwahl, die insbesondere die hohen Klassenwerte hervorhebt, zu achten ist. Darüber hinaus können in der Schadenspotenzialkarte die überflutungskritischen neuralgischen Punkte durch eine eigene Signatur ergänzt und markiert werden.

6.4 Gesamtfazit zur Schadenspotenzialanalyse

Die verfügbaren Methoden zur Bewertung des Schadenspotenzials für Überflutungen auf mikroskaliger Ebene unterliegen deutlich größeren Unsicherheiten als die Gefährdungsanalyse. Dies resultiert aus dem Umstand, dass einer enormen Vielfalt und Heterogenität an Objekteigenschaften (Nutzung, bauliche Ausgestaltung, etc.) ein vergleichsweise begrenzter Pool an öffentlichen bzw. frei verfügbaren Daten und Informationen gegenüber steht. Mit den vorgestellten Methoden zur Klassifizierung der Gebäudenutzung wurden die Anwendungsmöglichkeiten von ALKIS®-Informationen untersucht und aufgezeigt, dass damit eine gebietsweite, grobe Erstabschätzung von Schadenspotenzialen möglich ist und dass potenzielle Schadensschwerpunkte identifiziert werden können.

Allerdings werden diese Ergebnisse maßgeblich von der subjektiven Bewertung des Bearbeitenden bestimmt. In diesem Kontext ist es wichtig, sich der Leitfragestellung der Bewertung bewusst zu werden. Je nachdem, ob diese bezüglich der Schadenserwartung („Welches Schadensausmaß bzw. welche Schadenshöhe droht?“) oder bezüglich des Schutzbedarfs („Welches individuelle Schutzbedürfnis liegt weshalb vor?“) vorgenommen wird, können sich unterschiedliche Klassifizierungsergebnisse ergeben, weil die Fragen auf konträre Aspekte (Folgen des Schadenseintritts vs. Eintrittsvermeidung) abzielen. Während die erste Frage einen unmittelbaren begrifflichen Bezug zum Schadenspotenzial hat, adressiert die Frage nach dem individuellen Schutzbedürfnis stärker die jeweilige Risikotoleranz bzw. -akzeptanz und bezieht gedanklich die Vulnerabilität und die Bewältigungskapazität des Objekts mit ein. Sicherlich prägen beide Fragestellungen den subjektiven Klassifizierungsprozess.

Die Ansätze 2 und 3 gewährleisten mit der Bezugnahme auf die verschiedenen Vulnerabilitätsdimensionen oder einzelne charakteristische Schadenstypen einen enger geführten und ein Stück weit „objektivierten“ Bewertungsprozess. Wichtig ist in die-

sem Zuge auch, dass weitere Katasterinformationen, wie textliche Zusätze oder Gebäudedetails, sofern erfasst, implementiert oder nachträglich berücksichtigt werden.

Angesichts der methodisch und datentechnisch bedingten Unsicherheiten ist die kategorische „Markierung“ Kritischer Infrastrukturen über die höchste Schadenspotenzialklasse ein wichtiger Schritt für die anschließende Risikobewertung. Dieser Sonderstatus kann bedarfsweise auch auf überflutungssensible Infrastrukturen und Objekte“ (siehe Abschnitt 2.2.2) angewendet werden. Allerdings sind hier die Bewertungsunsicherheiten aufgrund der ALKIS®-Objektwertarten etwas größer. Wie die Schadenspotenzialklassifizierung nach Ansatz 3 am Fallbeispiel Neuwied gezeigt hat, ergibt sich auch anhand der Bewertung charakteristischer Schadenstypen eine sachgerechte Kennzeichnung für sensible Infrastrukturen und Objekte.

Im Übrigen ergeben sich bei der Anwendung im Fallbeispiel Neuwied erkennbare Unterschiede in der Klassifizierung der einzelnen Objektwertarten der Gebäudenutzung, wobei Ansatz 3 aufgrund des Detaillierungsgrades der Bewertungsgrundlage zu präferieren ist. Auch wenn aus Gründen der Visualisierung und Risikoüberlagerung (siehe Abschnitte 6.3 und 7.1.2) die Ergebnisreduktion auf eine maßgebliche (maximale) Schadenspotenzialklasse zweckmäßig ist, sollten unbedingt weiterführende Vulnerabilitätsinformationen, beispielsweise anhand bewerteter Schadenstypen, mit berücksichtigt und dargestellt werden.

Selbstverständlich bedürfen die hier vorgestellten Bewertungsansätze einer weiteren empirischen Absicherung. Dazu wäre eine größere Anzahl weiterer Expertenbeurteilungen aus einem möglichst breiten Stakeholderkreis (kommunale Vertreter und Fachplaner verschiedener Ressorts) einzuholen. Es wäre insgesamt wünschenswert und zweckmäßig, über eine derartige Verbreiterung der Bewertungsgrundlage zu einer standardisierten Schadenspotenzialbewertung auf Grundlage der ALKIS®-Objektwertarten zu kommen.

Die ebenfalls erforderliche Validierung ist letztlich nur auf Grundlage realer Schadensinformationen, die im Nachgang zu eingetretenen Überflutungsereignissen erhoben wurden, möglich oder anhand eines ausreichend großen Datenpools objektbezogener Detailanalysen. In diesem Zusammenhang wird der Verfügbarkeit von Versicherungsdaten, die bereits seit vielen Jahren im Fokus der Datenbeschaffung stehen, eine weiter wachsende Bedeutung zukommen.

Objektbezogene Detailanalysen sind als zweite Stufe der Schadenspotenzialbewertung sinnvoll, wenn höhere Anforderungen an die Bewertungsgüte gestellt werden. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn die Erstbewertung anhand der nutzungsbezogenen Katasterinformationen offenkundig zu ungenau ist, weil überflutungsrelevante Details nicht berücksichtigt sind oder wenn von einer Exposition des Gebäudes und damit möglicherweise von einem bestehenden Überflutungsrisiko auszugehen ist. Durch den Bezug auf eine oder verschiedene Gefährdungssituationen (Wasserstände, Zuflüsse) lässt sich die Betrachtung zu einer objektspezifischen Risikobewertung erweitern.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Zuständigkeiten bei der objektbezogenen Analyse auf privater Seite liegen und in Eigenverantwortung und –regie des Eigentümers, ggf. durch externe Beauftragung von Experten, durchzuführen sind.

7 Risikobewertung

Die Risikobewertung stellt den abschließenden Arbeitsschritt des Gesamtprozesses der Starkregen-Risikobeurteilung dar. Sie besteht im Kern aus der Zusammenführung und Kombination der Ergebnisse von Gefährdungs- und Schadenspotenzialanalyse. Trotz dieses vergleichsweise eng gefassten Arbeitsschwerpunkts ergeben sich hieraus verschiedene Detailfragen und Aspekte, die vorliegend diskutiert werden:

- In welchen Anwendungsfällen ist eine formale Überlagerung von Gefährdung und Schadenspotenzial zu einem Überflutungsrisiko sinnvoll?
- Wann reicht eine parallele Darstellung der beiden Risikokomponenten Gefährdung und Schadenspotenzial aus?
- Wie sind die gesamten Bewertungsergebnisse sachgerecht und anschaulich als Risikokarte zu visualisieren?
- Welche Möglichkeiten der Plausibilisierung können genutzt werden?

7.1 Identifikations- und Überlagerungsansätze

7.1.1 Visuelle Risikobewertung

Da sich die topografisch bedingten Gefährdungsbereiche und die Schadenspotenziale des Gebäudebestands nicht räumlich überlagern, sondern erst über die Komponente Exposition gekoppelt werden, ist eine gemeinsame Darstellung der beiden Risikokomponenten im Kartenwerk sehr anschaulich möglich (siehe auch Abschnitt 7.2). Damit lässt sich auf visuelle Art eine Risikobewertung durchführen, indem entweder ausgehend von einem Gefährdungsbereich die angrenzenden (exponierten) Risikoobjekte anhand ihres Schadenspotenzials bewertet werden. Umgekehrt kann mit Fokus auf bestimmtes Gebäude die angrenzende Gefährdungssituation zur Risikobeurteilung verwendet werden.

Das Merkblatt DWA-M 119 führt diese Vorgehensweise als eine erste Option einer detaillierten Risikobewertung an, bei der keine gesonderte Risikokarte, sondern nur eine Gefährdungs- und Schadenspotenzialkarte erzeugt wird (vgl. Abschnitt 2.3.3.2). Sie wird dann empfohlen, wenn eine rechnerische Überlagerung der Risikokomponenten zu unsicher ist, weil die jeweiligen Aussagetiefen zu unterschiedlich sind.

7.1.2 Risikobewertung auf Grundlage einer Überlagerungsmatrix

Soll die Risikobewertung anhand eines Zahlenwertes oder einer Risikoklasse erfolgen, bedarf es einer geeigneten mathematischen oder verbalen Überlagerungsregel, mit der die Klassifizierungen der Gefährdungsanalyse und der Schadenspotenzialanalyse kombiniert werden. Diese Überlagerungsregel wird mit Hilfe einer Risikomatrix definiert, die auch als Grundlage der GIS-gestützten Risikokarte dient.

Als ergebnisbestimmende Details zur Risikoabschätzung sind ferner die Gewichtung der Risikokomponenten, die Anzahl der gewählten Risikoklassen und die Definition der Klassengrenzen zu nennen.

Die Überlagerung sollte nach einer möglichst einfachen mathematischen Regel, beispielsweise durch Addition oder Multiplikation, durchgeführt werden. Beispiele für Überlagerungsmatrizen sind in Abbildung 7-1 unter Verwendung der in den vorangegangenen Abschnitten festgelegten Gefährdungs- und Schadenspotenzialklassen dargestellt.

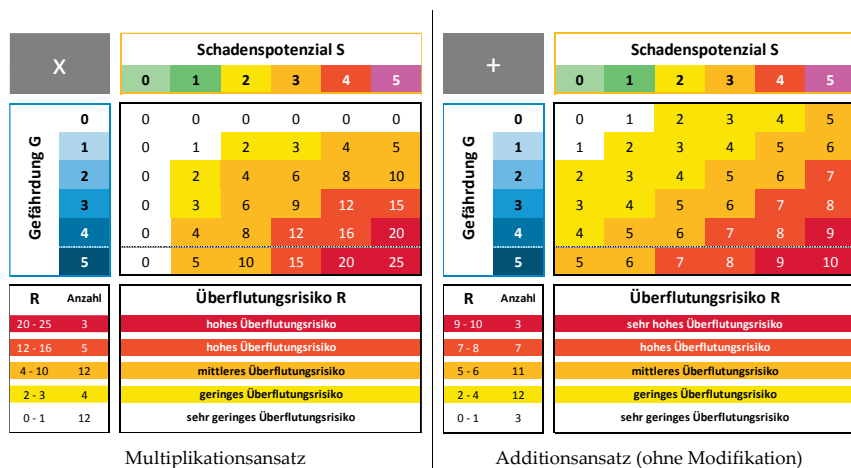


Abbildung 7-1: Multiplikations- und Additionsansatz zur Risikobewertung als Überlagerung von Gefährdung G und Schadenspotenzial S

Bei der Erstellung der Risikomatrix sind die spezifischen Auswirkungen der Operatoren auf das Ergebnis zu berücksichtigen: Der Multiplikationsansatz liefert über das Produkt $G \cdot S$ eine wesentlich breitere Wertespanne als der Additionsansatz. Zusätzlich ergibt sich die Besonderheit, dass ein Klassenwert von Null sowohl für eine sehr geringe Überflutungsgefährdung abseits von Senken und Fließwegen als auch für ein sehr geringes Schadenspotenzial kategorisch zu einem Nullwert des Risikos führt (Abbildung 7-1 links). Bezogen auf die Gefährdung ist dies auch sachgerecht und methodisch gewollt; schließlich soll aus einer nicht signifikanten Gefährdung kein

Risiko resultieren. Bezüglich der Auswirkung einer Schadenspotenzialklasse 0 („sehr gering“) ist dies angesichts der dargelegten Bewertungsunsicherheiten und möglicher Fehleinschätzungen zu hinterfragen. Soll für $S = 0$ das Risiko nicht kategorisch ausgeschlossen sein, wäre eine Klassifizierung des Schadenspotenzials von 1 bis 6 für diesen Ansatz besser geeignet.

Eine weitere Herausforderung liegt ansatzunabhängig in der Zuordnung der resultierenden Risikowerte R zu definierten Risikoklassen. Es gibt hierfür nur die allgemeine Empfehlung, die das Spektrum der Risikowerte möglichst homogen und ausgewogen auf die gewählte Anzahl an Risikoklassen zu verteilen. In einem anschließenden Schritt sind einzelne Kombinationen von G und S auf Plausibilität innerhalb benachbarter Zuordnungen zu prüfen. Ferner sind die Auswirkungen der Klassifizierung anhand des Kartenwerks zu bewerten. So kann beispielsweise für bekannte Risikobereiche der Vergangenheit überprüft werden, ob die gewählten Klassenkombinationen zu sinnvollen und plausiblen Risikodarstellungen im Kartenwerk führen.

Für das konkrete Fallbeispiel Saarbrücken wurden vergleichende Untersuchungen zu den vorgenannten Überlagerungsansätzen der Risikobewertung durchgeführt und anhand der erzeugten Risikokarten miteinander verglichen. Die zugehörigen sind nachfolgend sowie ergänzend in Anhang A-8 dokumentiert.

Es ergibt sich anhand des Multiplikationsansatzes im Gesamtbild eine differenziertere Darstellung des Risikos als beim Additionsansatz. Der gesonderte Einfluss der Gefährdungsklasse 0 führt zu einer geeigneten Risikodarstellung im Kartenwerk, bei der nur die signifikanten Gefährdungsbereiche (Fließwege, Senken) und exponierten Gebäude hervorgehoben werden.

Der Additionsansatz führt insgesamt mit einer geringeren Wertespanne zu einer homogeneren Verteilung der Risikoklassen (Abbildung 7-2 unten), erzeugt jedoch auch bei sehr geringer Gefährdung (Klasse 0) bereits eine mittlere Risikoeinstufung. Dies ist methodisch nicht erwünscht (s. o.) und würde zudem ein insgesamt kritischeres Bild des Überflutungsrisikos erzeugen, was sich bereits aus dem direkten Vergleich der beiden Matrizen (Abbildung 7-1) anhand der absoluten Werthäufigkeiten erkennen lässt. Zur Korrektur dieses Sachverhalts wird vorgeschlagen, das Risiko bei Gefährdungsklasse 0 kategorisch auf $R = 0$ zu setzen. Mathematisch kann dazu der Additionsansatz über eine Multiplikation mit der Signumfunktion zu G entsprechend Gleichung (12) modifiziert werden. Die Auswirkungen dieser Modifikation verdeutlicht Abbildung 7-3.

$$R = (G + S) \cdot \text{sgn}(G) \quad (12)$$

mit: R = resultierender Risikowert
 G = Gefährdungsklasse gemäß Gleichung (3)
 S = Schadenspotenzialklasse gemäß Gleichung (4)



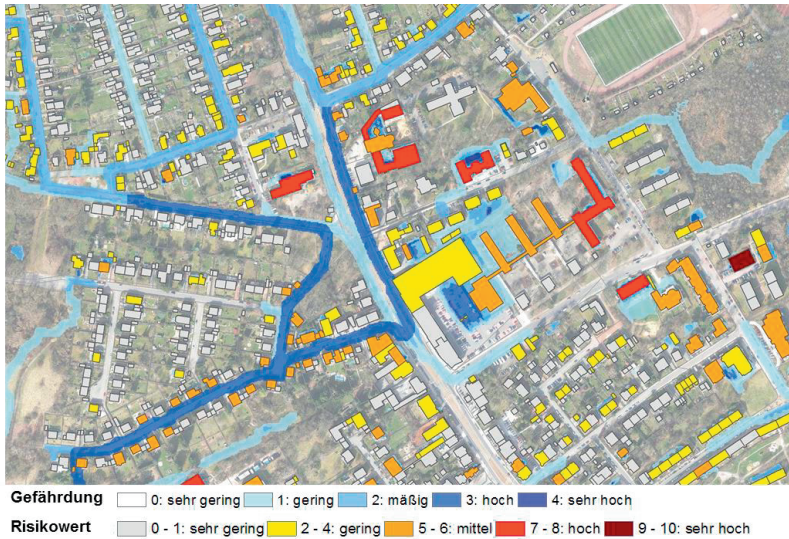
Gefährdung 0: sehr gering 1: gering 2: mäßig 3: hoch 4: sehr hoch
Risikowert 0 - 1: sehr gering 2 - 3: gering 4 - 10: mittel 12 - 16: hoch 20 - 25: sehr hoch



Gefährdung 0: sehr gering 1: gering 2: mäßig 3: hoch 4: sehr hoch
Risikowert 0 - 1: sehr gering 2 - 4: gering 5 - 6: mittel 7 - 8: hoch 9 - 10: sehr hoch

Geodatengrundlage: © LHS/LVGL (2016)

Abbildung 7-2: Beispiel einer Risikokarte gemäß Multiplikationsansatz (oben) und Additionsansatz ohne Korrektur und Gewichtung (unten), Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)



Geodatengrundlage: © LHS/LVGL (2016)

Abbildung 7-3: Beispiel einer Risikokarte gemäß sgn(G)-modifiziertem Additionsansatz, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

Die beiden Ansätze führen vor allem bei stark unterschiedlichen Klassifizierungen von Gefährdung und Schadenspotenzial (Kombination sehr gering – hoch) zu unterschiedlichen Risikobewertungen. Allgemein gültige Empfehlungen, mit welchem Ansatz das Überflutungsrisiko besser und zutreffender abgebildet wird, lassen sich nur sehr eingeschränkt formulieren. Liegen in einem Untersuchungsgebiet vergleichsweise viele Gebäude mit hoher Schadenspotenzialklassifizierung vor, erscheint die gemäßigte Überlagerung per Multiplikation eher geeignet zu sein als der Additionsansatz. Umgekehrt scheint die Additionsüberlagerung dann die geeignetere Risikodarstellung zu sein, wenn wenige hochgefährdete und hochvulnerable Bereiche vorliegen und vor allem wenn kritische, neuralgische Punkte hervorzuheben sind.

Die Auswirkungen der hier diskutierten Überlagerungsansätze sind anhand einer Gebäudestatistik zur Risikoverteilung für das Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken) abschließend in Abbildung 7-4 dokumentiert. Darin ist die gravierende Risikoüberschätzung eines nicht-modifizierten Additionsansatzes erkennbar.

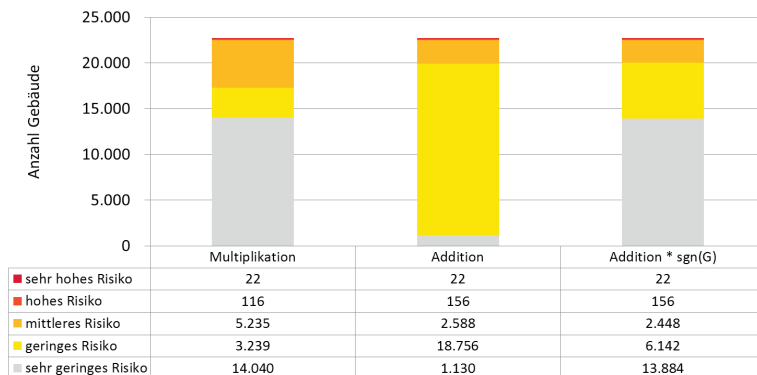


Abbildung 7-4: Statistische Verteilung der Überflutungsrisiken für Gebäude nach verschiedenen Überlagerungsansätzen von Gefährdung G und Schadenspotenzial S, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

Die bisher vorgestellten Überlagerungsmatrizen basieren auf dem Grundsatz, dass Gefährdung und Schadenspotenzial jeweils gleichberechtigten Einfluss auf das resultierende Risiko haben, sodass die jeweils kommutativen Klassenpaare (z.B. 1/5 und 5/1) zur gleichen Risikoklasse führen. Diese Prämisse ist jedoch zu hinterfragen.

Mit Blick auf die allgemeine Wahrnehmung von Starkregenüberflutungen in der Öffentlichkeit und vor allem auf die Anliegen und Reaktionen betroffener Bürger liegt erwartungsgemäß ein sehr starker Fokus auf den erkennbaren Vulnerabilitäten und dem festgestellten Schadensausmaß. Die medialen Berichterstattungen stellen meist Schadensmeldungen („Anzahl vollgelaufener Keller“, „Feuerwehreinätze“, etc.) in den Vordergrund. Auch potenziell Betroffene, die über ihre individuelle Risikolage informiert werden, stellen vorrangig Fragen nach dem möglichen Schadensausmaß („Wo und wie stark kann ich geschädigt werden und wie kann ich mich dagegen schützen?“). Die Frage nach der Gefährdung als Überflutungsursache („Welcher Gefährdung bin ich wie intensiv, wie lange ausgesetzt?“) steht eher an zweiter Stelle.

Der Sachverhalt, dass in der allgemeinen Wahrnehmung die negative Auswirkung auf das Risikoobjekt das individuell empfundene Risiko wesentlich stärker prägen kann als die Gefährdung als Risikoursache wird auch von Hauger et al. (2006) vertreten. Sie führen hierzu das Beispiel von Reisenden mit Flugangst an: Obwohl bei Flugreisen als der nachweislich sichersten Reiseform die geringste Gefahr besteht zu verunglücken, entscheiden sich die betreffenden Personen angesichts der ultimativen potenziell schädlichen Auswirkung (Absturz mit nahezu 100% Todeswahrscheinlichkeit) für ein anderes „riskanteres“ Reisemittel (Pkw, Bahn). Diese Entscheidung treffen sie als bewusste, individuelle Risikoabwägung, obwohl sie damit objektiv betrachtet ein höheres Risiko eingehen zu verunglücken (Hauger et al. 2006, S. 442).

Entsprechend dieser Argumentation wäre es sachgerecht, bei der Risikobewertung ein stärkeres Gewicht auf die Vulnerabilität bzw. das Schadenspotenzial zu legen trotz der im Vergleich zur Gefährdungsanalyse deutlich größeren methodischen Ungenauigkeiten. Eine entsprechende Umsetzung dieser Überlegung kann über Wichtungsfaktoren für die Gefährdung (a_G) und das Schadenspotenzial (a_S) erfolgen. Mit einer beispielsweise doppelten Gewichtung des Schadenspotenzials ergeben sich die in Abbildung 7-5 dargestellten Risikowerte und -klassen. Ein entsprechendes Kartenbeispiel in Anhang A-8 dokumentiert.

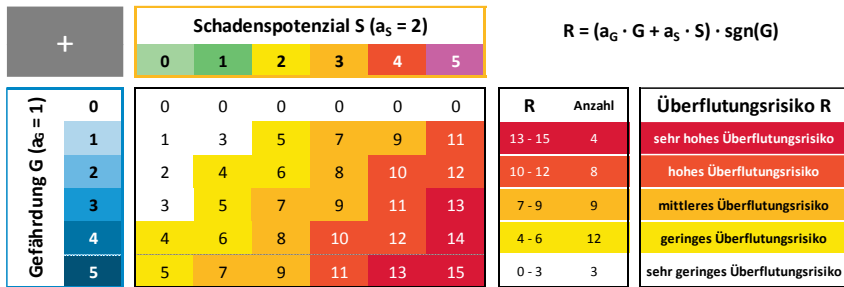


Abbildung 7-5: Modifikation des Additionsansatzes zur Risikobewertung als Überlagerung von Gefährdung G und Schadenspotenzial S

7.2 Risikokarte

Mit der Risikokarte für Starkregenüberflutungen wird das Endergebnis des Gesamtprozesses der Risikoanalyse visualisiert und eine fundamentale Arbeitsgrundlage für die anschließenden Schritte der Risikokommunikation und des Risikomanagements breit gestellt. Zuvor sollte auf ihrer Grundlage eine Plausibilisierung der Ergebnisse durchgeführt werden (Abschnitt 7.3).

Entsprechend den vorangegangenen Anmerkungen zur Risikobewertung wird empfohlen, die Risikokarte auf Grundlage einer Matrixüberlagerung von Gefährdung und Schadenspotenzial zu generieren. Es sollten darin standardmäßig die Risikoklassen der bewerteten Gebäude zusammen mit den Gefährdungsklassen der Senken und Fließwege dargestellt werden. Dies ermöglicht eine parallele und ergänzende Sichtung der Gefährdung, was die Nachvollziehbarkeit erleichtert. Zusätzlich wird empfohlen, die Risikodarstellung durch die Markierungen der neuralgischen Punkte zu komplettieren (Abbildung 7-6).

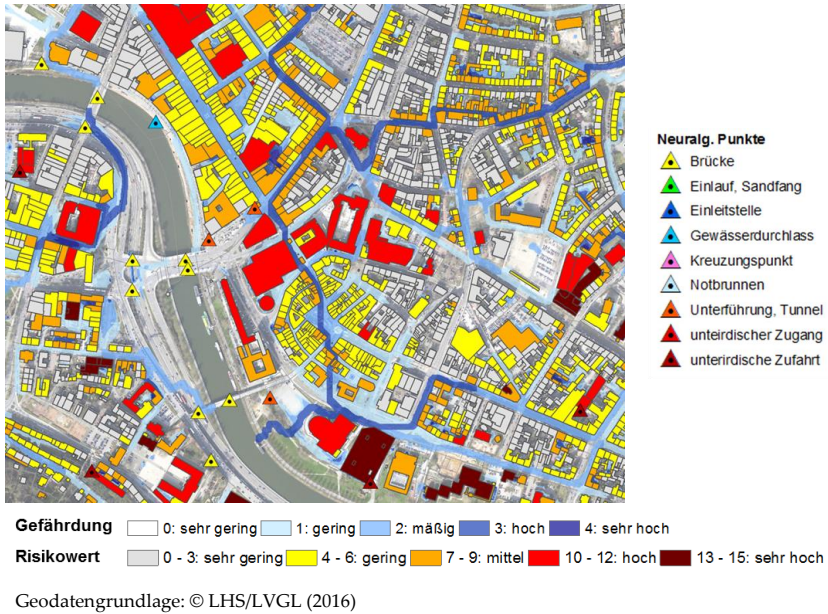


Abbildung 7-6: Beispiel einer Starkregen-Risikokarte mit ergänzender Darstellung von Gefährdungsklassen und neuralgischen Punkten, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

Ergänzend können die bereits diskutierten vereinfachten Risikokarten als gemeinsame Darstellung von Gefährdung und Schadenspotenzial exponierter Gebäude erzeugt und ausgewertet werden (Abschnitt 7.1.1). Ebenso sind Risikokarten für Einzeldimensionen der Vulnerabilität denkbar und für gesonderte Fragestellungen auch sinnvoll.

Gemessen an der ergebnisprägenden Bedeutung des Schadenspotenzials müsste die Risikobewertung dieses viel stärker und differenzierter, beispielsweise anhand der Vulnerabilitätsdimensionen oder der charakteristischen Schadenstypen, abbilden. Während analogen Risikokarten jedoch die hierzu erforderlichen Darstellungsmöglichkeiten fehlen, können digitale Kartenversionen in GIS hier verbesserte Visualisierungsformen (Wertesäulen, Kreisdiagramme, etc.) bereitstellen.

7.3 Ergebnisplausibilisierung

7.3.1 Vorbemerkungen

Die gesamte Abfolge der hier thematisierten GIS-basierten Starkregen-Risikoanalyse, beginnend mit der Auswahl und Definition der Indikatoren, deren methodische Umsetzung im Zuge der Gefährdungs- und Schadenspotenzialanalyse, aber auch die anschließende Risikobewertung unterliegen verschiedenen Freiheitsgraden und den Einflüssen subjektiver Festlegungen. Insofern ist es zur Bewertung der Methodik und ihrer Ergebnisse unbedingt erforderlich, die erzeugten und im Kartenwerk dargestellten Ergebnisse zu validieren bzw. auf ihre Plausibilität zu überprüfen. Hierbei sind projektspezifisch u.a. folgende Aspekte zu bewerten:

- Welche Datengrundlagen können zur Ergebnisplausibilisierung in welcher Form und Aussagegüte herangezogen werden?
- Wie gut und umfangreich lassen sich insbesondere Feuerwehreinsätze und Betriebsmeldungen allgemein und mit Bezug auf Überflutungsereignisse der Vergangenheit anhand der Gefährdungspotenzial- und Risikokarte nachvollziehen und plausibel erklären?
- Wo liegen methodisch bedingte Darstellungsgrenzen und -unschärfen des Kartenwerks, insbesondere der Risikokarte?

Unabhängig davon, ob die Methodik der Risikoanalyse GIS-basiert oder simulationsgestützt erfolgt, besteht das vorherrschende Problem bei der Ergebnisvalidierung darin, dass es hierfür nur wenige Optionen gibt, die sich vorrangig auf die Dokumentation historischer Ereignisse und/oder Ortsbegehungen stützen. Denn die für eine Validierung erforderlichen Parameter, wie Überflutungstiefen und -ausdehnungen, Fließgeschwindigkeiten, etc. sind weder räumlich noch zeitlich bekannt und bestenfalls nur lokal begrenzt verfügbar. Da der Genauigkeitsanspruch einer Validierung somit in der Regel nicht bedient werden kann, geht es um eine möglichst fundierte Plausibilisierung der erzeugten Karteninhalte.

Die Plausibilisierung kann sowohl ereignisübergreifend als auch bezogen auf ein einzelnes Überflutungsereignis erfolgen. Daneben kann die Plausibilisierung gebietsweit oder fallbeispielbezogen vorgenommen werden. Die genannten Ansätze werden nachfolgend beschrieben. Sie sind vorzugsweise als aufeinander aufbauende bzw. zu kombinierende Prozessschritte anzusehen.

7.3.2 Ereignisübergreifende Plausibilisierung

Bei einer belastungsunabhängigen Methode der Risikoanalyse erfolgt die Ergebnisplausibilisierung standardmäßig anhand einer allgemeinen Auswertung aller verfügbaren Erfahrungen und Beobachtungen zur Überflutungshistorie. Diese umfasst die Informationslage zu den Gefährdungs- und Schadensausmaßen der in der jüngeren Vergangenheit aufgetretenen Überflutungsereignisse.

Starkregenüberflutungen sind als kausale Ereignisse über entsprechende Ursachen und Wirkungen beschreibbar und erklärbar. Vor diesem Hintergrund ist die Analyse der Überflutungshistorie vorrangig der qualitativen Beschreibung der Wirkungsseite von Überflutungsereignissen zuzuordnen, während beispielsweise Niederschlagsdaten die Ursache von Überflutungen (mit)beschreiben.

Es stehen in der Regel verschiedene Datenpools zur Verfügung, auf die sich die Analyse der Historie auch umfassend und möglichst breit stützen sollte. Diese umfassen:

- Dienst- und Einsatzprotokolle von Feuerwehren und Technischen Hilfsdiensten,
- Dienst- und Betriebserfahrungen des kommunalen Entwässerungs- oder Entsorgungsbetriebs,
- Öffentliche und private Medienberichterstattungen (Presse, Rundfunk, TV, Social Media)
- Objektbezogene Informationen, einzeln oder aggregiert (Auskünfte lokal Betroffener, Versicherungsdaten)

Es ist eine große Heterogenität in den Dateneigenschaften erkennbar. Die Datenpools unterscheiden sich bzgl. ihrer räumlichen Ausdehnung, ihrer Aktualität, Objektivität und Vollständigkeit. Ebenso ist zu differenzieren, auf welche Risikokomponenten sie sich beziehen oder wie „zeitbeständig“ sie sind, d. h. ob sich die Informationsqualität mit zunehmendem Zeitabstand zu einem Ereignis verschlechtert. Tabelle 7-1 charakterisiert die genannten Datenpools nach diesen verschiedenen Merkmalen und zeigt deren Vielfalt. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass damit nicht gleichbedeutend ein ausreichend großer Datenumfang verbunden ist. Es besteht vielmehr das Problem, dass die Gesamtheit der verfügbaren Ereignisinformationen oftmals sehr begrenzt ist.

Mit der **Auswertung vorhandener Dienst- und Einsatzprotokolle der zuständigen Feuerwehrkräfte** und Technischen Hilfsdienste können erste belastbare Hinweise auf Gefährdungs- und Risikobereiche eines Untersuchungsgebiets gewonnen werden. In ähnlicher Form gilt dies für die **Betriebserfahrungen** des Kanalnetzbetreibers (Stadtentwässerungs- und Entsorgungsbetriebe). Für beide Datenquellen, die vorrangig die Gefährdungslage belegen, bedarf es einer möglichst zeitnahen Erfassung und Auswertung nach einem Ereignis, um möglichst gut die Gefährdungsursachen und Ereignisrandbedingungen zu identifizieren.

Tabelle 7-1: Verschiedene Daten- und Informationspools zur Ereignishistorie – Merkmale und Charakterisierung

<i>Merkmale</i>	<i>Feuerwehr-Einsätze</i>	<i>Betriebs-meldungen</i>	<i>Öffentliche Medien-berichte</i>	<i>Berichte Social Media</i>	<i>Anwohner-informa-tionen</i>	<i>Versicherungsdaten</i>
<i>Informationsgehalt Gefährdung</i>	+	+	o	++	+	--
<i>Informationsgehalt Schadenspotenzial</i>	-	-	o	fallspez.	++	+
<i>Räumliche Ausdehnung</i>	++	++	o	-	-	+
<i>Objektivität / Neutralität</i>	++	++	+/o	+/o	o/-	++
<i>Vollständigkeit / Zuverlässigkeit</i>	+/o	++	o/-	++	+	+/o
<i>Verfügbarkeit</i>	++	++	fallspez.	fallspez.	--	--
<i>Beständigkeit</i>	+/o	+	++	++	-	+
<i>Aktualität</i>	+	+	++	++	--	-

Legende: ++ sehr hoch; + hoch; o mittel; - gering; -- sehr gering

Die öffentliche **Medienberichterstattung** (lokale Presse, Rundfunk, Internet) über Starkregen- und Überflutungsereignisse stellt eine weitere Informationsquelle dar, deren Stellenwert in den letzten Jahren zugenommen hat, auch, weil die vielerorts subjektiv wahrgenommene Häufung von (extremen) Starkregenüberflutungen meist im Kontext eines stattfindenden Klimawandels interpretiert wird. Allerdings liefern Medienberichte bezüglich ihrer Beschreibungstiefe in der Regel nur ergänzende oder begrenzte Hinweise auf besondere Überflutungs- und Schadensschwerpunkte. Aussagen zur gebietsweiten Ausprägung des Ereignisses sind in der Regel sehr allgemein und unspezifisch.

Viel besser verwertbar sind demgegenüber Medienberichte auf privater Ebene, die über die zahlreichen Wege sozialer Netzwerke und **Social Media** bereits seit mehreren Jahren und mit sehr hoher Wachstumsdynamik verfügbar sind. Die Vorteile dieser Informationsquelle bestehen in einer zeit- und meist sehr detailscharfen Erfassung und Konservierung individueller, unmittelbarer Beobachtungen (Wasserstände, Wasserausdehnungen, Fließstiefen und –geschwindigkeiten), die kurzfristig in großer Breite über die Internetmedien verfügbar sind.

Ergänzend ist es empfehlenswert, neben diesen weitgehend objektiven Informationsquellen auch **Anwohnerbefragungen** durchzuführen. Dieser sind zwar aufgrund der persönlichen Betroffenheit oftmals von subjektiven Eindrücken und Wahrnehmungen des Ereignisablaufs geprägt. Dennoch können sie, insbesondere wenn das erlebte Starkregenereignis erst kurze Zeit zurückliegt, zusätzliche Erkenntnisse zu Ablauf und ggf. Ursachen eines Schadensereignisses liefern. Zu beachten ist jedoch, dass sich die Zuverlässigkeit von Anwohnerauskünften mit zunehmendem Zeitabstand zum Ereignis verringern kann.

Die **Daten von Versicherungsunternehmen** zu Schadensmeldungen spiegeln die Anwohnerinformationen ebenfalls wider, jedoch in aggregierter Form und begrenzt auf die monetäre Bewertung der Teilmenge an versicherten und gemeldeten Objekten. Anhand der Schwierigkeiten, aus diesem Datenbestand Schadensfunktionen abzuleiten (König et al. 2002; Zhou et al. 2012b) wird deutlich, dass es ungleich schwerer ist, Ergebnisse der Risikobewertung damit zu plausibilisieren, da in der Regel die zu einer Schadensmeldung zugehörige Gefährdungslage nicht genau beschrieben ist.

Auch wenn grundsätzlich möglichst viele der genannten Datenpools zur Plausibilisierung genutzt werden sollten, so sind diese je nach Untersuchungsgebiet sehr unterschiedlich verfügbar. Den breitesten Datenfundus bieten in der Regel die Einsatz- und Betriebsdaten der Feuerwehren, wobei die Social Media-Informationen aufgrund ihrer zunehmenden Präsenz immer bedeutender werden, insbesondere in Stadträumen. Anwohnerbefragungen hingegen stehen zunächst nicht zur Verfügung und sind mit entsprechend hohem Aufwand gesondert zu erheben.

Für das Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken) wurden im Rahmen des Projektes UVoSaar (Schmitt und Scheid 2014) die Ergebnisse der Risikoanalyse anhand registrierter Feuerwehreinätze (75 Meldungen aus fünf Jahren) ausgewertet. Die Auswertung erfolgte als GIS-basierte Abstandsanalyse mit anschließender statistischer Lageauswertung von Feuerwehreinätzen und ermittelten Gefährdungszonen. Einzelheiten zur Vorgehensweise und zu den Ergebnissen sind in Anhang A-9 zusammengefasst.

Die Auswertung zeigt, dass ca. 80 % der registrierten Einsätze in einen eindeutigen kausalen Zusammenhang mit einer ausgewiesenen, erhöhten Gefährdungslage gesetzt werden können und dass demnach für den betreffenden Gefährdungsbereich eine hohe Plausibilität festgestellt werden kann. Es ist jedoch als methodische Einschränkung zu beachten, dass Feuerwehreinätze zwar Indizien eines hohen Überflutungsrisikos sind, sich jedoch bezogen auf die Risikodefinition definitionsgemäß nur zur Plausibilisierung einer hohen Gefährdungslage eignen, weil sie in der Regel keine umfassenden Detailinformationen zu den mit den Einsätzen verbundenen Schadensausmaßen beinhalten.

7.3.3 Ereignisbezogene Plausibilisierung

Oftmals sind konkrete Einzelereignisse mit meist außergewöhnlichen Überflutungsprägungen der Anlass, GIS-basierte Risikoanalysen durchzuführen und deren Ergebnisse anhand dieses „Referenzereignisses“ zu plausibilisieren. Diese Fragestellung richtet sich natürlich zunächst an die belastungsabhängigen Verfahren der Gefährdungsanalyse (2D- oder gekoppelte 1D/2D-Simulationen). Allerdings möchte man auch für eine GIS-basierte Risikokarte feststellen, ob und wie gut sich die real aufgetretenen Risikobereiche im Kartenwerk wiederfinden.

Methodisch sind für eine solche ereignisbezogene Plausibilisierung grobe hydrologische Abschätzungen des Niederschlagsabflussprozesses vorzunehmen und einfache Volumenbilanzen für das Referenzereignis zu erstellen. Das Merkblatt DWA-M 119 (DWA 2016) führt diesen Ansatz als statische Volumenbetrachtung (siehe Abschnitt 2.3.1.2).

Für die Bilanzierung des Niederschlagsvolumens sind möglichst Radarmessungen zu verwenden, um die räumliche Diversität eines Ereignisses ausreichend abzubilden. Entsprechende Radardaten des Deutschen Wetterdienstes sind als RADOLAN-Kompositprodukte¹¹ (DWD 2018) kostenfrei mit einer räumlichen Auflösung von 1 km² verfügbar.

Da bei der Erstellung der Volumenbilanzen die zeitliche Dynamik des Niederschlags-Abflussgeschehens nicht berücksichtigt wird, herrschen hierfür keine hohen Anforderungen an die zeitliche Auflösung der Radardaten, sodass beispielsweise 1 h-Summenwerte, wie sie das Kompositprodukt RW liefert, ausreichen. Anders verhält es sich, wenn es darum geht, kurzzeitige Überlastungsspitzen der Kanalisation, die zu schädlichem Überstau führen, zu bewerten. Hierfür sind auch zeitlich höher aufgelöste Radarinformationen sinnvoll.

Zunächst sollte die räumliche Korrelation von radargemessenen Niederschlagschwerpunkten und Überflutungshotspots, die anhand der Feuerwehreinsätze erkennbar sind, untersucht werden. Die anschließende rasterbasierte Umrechnung der Niederschlagssummen liefert für alle (abflussgewichteten) Senkeneinzugsgebiete Abflussvolumina, die bilanziert und als Einstauhöhen der Senken und Überflutungsausdehnungen in der Gefährdungskarte visualisiert werden. In diesem Kontext bezieht sich die Plausibilisierung auch auf verschiedene methodische Detailfragen, die bei der statischen Volumenbetrachtung bedeutsam sind.

Erstens sind die Einflüsse des Abflussbeitrags der Kanalisation als entsprechende Abminderung der effektiven Gesamtniederschlagshöhe und damit der maximalen Senkenfüllung und -ausdehnung zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 2.3.1). Da entsprechende Simulationsergebnisse nicht verfügbar sind, bedarf es einer ersten Abschätzung, die je nach Verfügbarkeit anhand hydraulischer Parameter der Kanalisation (z. B. Auslastungsgrade aus GEP-Kanalnetzberechnungen) oder pauschal vorgenommen werden können. Vorliegend für das Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken) durchgeführte Analysen zeigen, dass sich pauschale Abzüge zwischen 5 mm und 25 mm, die statistisch im Bereich eines ein- bis zweijährlichen Niederschlagsereignisses der Dauerstufe D = 60 min einzuordnen sind, erhebliche Unterschiede im Senkeneinstau bedeuten können (Schmitt und Scheid 2014).

¹¹ RADOLAN (Radar-Online-Aneichung) bezeichnet ein Routineverfahren, bei dem punktuell an Niederschlagsstationen des DWD gemessene stündliche Niederschlagshöhen mit der räumlichen Niederschlags erfassung der 17 C-Band-Wetterradare des DWD kombiniert werden zu flächendeckenden, räumlich und zeitlich hoch aufgelösten quantitativen Niederschlagsdaten (Einheit 1/10 mm pro Zeitauflösung) im Echtzeitbetrieb für Deutschland.

Zweitens hat zusätzlich der Senkenüberlauf nach Vollfüllung bei den meisten Überflutungsereignissen einen großen Einfluss auf die Senkenausdehnungen und das Gesamtbild der ereignisbezogenen Gefahrenlage, wie bereits in Abschnitt 5.3.4 dargestellt. Es empfiehlt sich, die ermittelten Niederschlagsabflusshöhen h_{NA} jedes einzelnen Senkeneinzugsgebiets für das Bezugsereignis statistisch über eine Häufigkeitsverteilung auszuwerten (Abbildung 7-7). Auf dieser Grundlage kann der Anteil der überlaufenden Einzelsenken zumindest größenordnungsmäßig abgeschätzt werden. Beispielsweise zeigt die Häufigkeitsverteilung von h_{NA} für das Ereignis vom 03.07.2009, dass mit Niederschlagsabflusshöhen h_{NA} zwischen 6,1 mm und 15 mm eine Größenordnung vorliegt, die als noch vollständig von der Kanalisation ableitbar anzusehen ist. Tatsächlich lagen bei diesem Überflutungsereignis die Ursachen nicht in einer unmittelbaren extrem starken Überregnung der Senkeneinzugsgebiete, sondern in enormen Außengebietsabflüssen und einer lokalen Hochwassersituation durch Ausuferen eines urbanen Gewässers (siehe Schmitt und Scheid 2014).

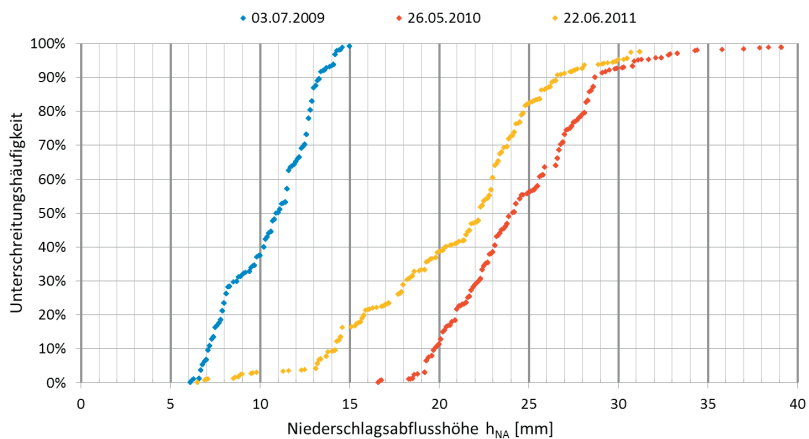


Abbildung 7-7: Häufigkeitsverteilungen der Niederschlagsabflusshöhen je Einzelsenke für ausgewählte Starkregenereignisse, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken), (Schmitt und Scheid 2014)

Zur näheren Plausibilisierung sind die für ein Ereignis erzeugten räumlichen Senkenausdehnungen wie vorangegangen beschrieben mit den aus den Feuerwehreinsätzen, Medienberichten und ggf. Betriebs- und Schadensmeldungen bekannten Überflutungsschwerpunkten zu vergleichen. Die Aussagegüte eines solchen Vergleichs wird dabei maßgeblich von der Anzahl, aber auch von der räumlichen Verteilung der aufgetretenen Einsätze eines Überflutungsereignisses bestimmt und ist ggf. entsprechend limitiert. Es ist darüber hinaus wichtig, möglichst genaue Kenntnisse über die Einsatzursachen zu erhalten.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass es zur GIS-technischen Realisierung des Teileinstaus der Senken für ein definiertes Überflutungsereignis korrekterweise einer Volumenintegration bedarf, bei der für ein bekanntes Einstauvolumen die korrespondierende Teilfüllungshöhe zunächst unbekannt ist. Entsprechende Untersuchungen, die für das Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken) durchgeführt wurden, belegen, dass der vereinfachende Ansatz einer empirischen Speicherinhaltslinie gemäß Gleichung (13) zur näherungsweise Berechnung der Einstauhöhe gerade bei größeren bzw. weitläufigeren Senken zu erheblichen Höhenabweichungen (im Dezimeterbereich) führen kann (Scheid et al. 2014). Dies gilt insbesondere, wenn der Exponent b der Speicherinhaltsgleichung auf einen Standardwert von beispielsweise $b = 2$ gesetzt wird (Maniak 2010 empfiehlt ein Wertespektrum bei Hochwasserrückhaltebecken zwischen $b = 1,0$ und $b = 4,5$). Insofern sollte bedarfsweise dort, wo sich weit ausgedehnte Senken als Gefahrenbereiche ergeben, trotz des erhöhten Arbeitsaufwands eine Volumenintegration durchgeführt werden.

$$S(H) = a \cdot H^b \quad (13)$$

mit: $S(H)$ = Speicherinhalt (Einstauvolumen) in Abhängigkeit
von der Füllhöhe H
 H = Füllhöhe (Teileinstau)
 a = Anpassungsfaktor (standardmäßig $a = 1$)
 b = Exponent zur Beschreibung der räumlichen
Senkengeometrie

7.3.4 Einzelfallbezogene Plausibilisierung

Während die vorgenannten Plausibilisierungsansätze sich auf das gesamte Untersuchungsgebiet beziehen, fokussiert dieser Ansatz ausgewählte Einzelbereiche, die entweder als gesonderte Gefährdungs- oder Risikobereiche aus der Vergangenheit bekannt sind oder aufgrund der Analyseergebnisse als solche ausgewiesen werden. Dies stellt die am häufigsten angewendete und auch fundierteste Methode dar, weil damit sowohl die Aussagegüte als auch die Aussagegrenzen der Gefährdungs- und Risikoanalyse in einem eng definierten und damit leicht handhabbaren Rahmen bewertet werden können.

Als Informationsquellen werden dazu wie zuvor auch die Einsatzmeldungen der Feuerwehr, des Kanalbetriebs, Medienberichte und vor allem Ortsbegehungen herangezogen. Idealerweise wird diese Plausibilisierung zur Ergänzung der vorgenannten ereignisbezogenen Betrachtung, also auf Grundlage eines konkreten Überflutungsereignisses durchgeführt. Nachteilig ist dabei der vergleichsweise hohe Aufwand durch die Situationsbeurteilungen vor Ort, weil neben den lokal vorherrschenden Gefährdungsbedingungen auch die gebäudebezogenen Details zur Exposition oder zur Objektivulnerabilität zu analysieren sind.

Im Einzelnen sollte die Plausibilisierung insbesondere folgende Bewertungsaspekte beinhalten:

- Vor-Ort-Sichtung der identifizierten Gefährdungsbereiche (Senkenlagen und Flutachsen mit Beurteilung der Nachvollziehbarkeit anhand der Örtlichkeit).
- Identifikation ggf. vorhandener baulicher Details, die methodisch bedingt bei der Gis-basierten Risikoanalyse unzureichend oder fehlerhaft abgebildet wurden.
- Visuelle, über die GIS-Informationen hinaus gehende Gesamtbeurteilung des Senkeneinzugsgebiets (Flächenbeschaffenheit, Gefälleübergänge, Nutzungsverhältnisse, gefährdungsverschärfende Details, etc.)
- Vulnerabilitätsbeurteilung vorhandener Risikoobjekte (Wasserzutrittsmöglichkeiten, Gebäudeschwachstellen, Bauweise, etc.)

Zu beachten ist, dass die Erkenntnisse dieser Plausibilisierung hinsichtlich der Aussagefähigkeit der Risikoanalyse nicht auf die Gesamtsituation und andere Bereiche des Untersuchungsgebiets übertragbar sind. Es bedarf somit in jedem Falle einer breiteren Bewertungsgrundlage und Plausibilisierung mehrerer Überflutungshotspots, um die Ergebnisgüte der Risikoanalyse beurteilen zu können.

Die für das Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken) durchgeführten Einzelfallplausibilisierungen sind im Detail in (Schmitt und Scheid 2014) beschrieben.

7.4 Fazit

Bei der **Risikobewertung** sind mit den Teilergebnissen der Gefährdungs- und Schadenspotenzialanalyse Informationen unterschiedlicher Aussagetiefe und Genauigkeiten gemeinsam zu verarbeiten. Bei einer Überlagerung der beiden Risikokomponenten werden faktisch die größeren Bewertungsunsicherheiten der Schadenspotenzialanalyse auf die Risikobewertung vererbt, in gleichem Zuge der relativ zuverlässige Informationsgehalt der Gefährdungsklassifizierung abgeschwächt.

Insofern stellt sich grundsätzlich die Frage, ob mit einer Zusammenführung und Kombination der beiden Komponenten zu einem Risikowert eine geeignete Informations- und Arbeitsgrundlage für die weiterführenden Schritte des Starkregen-Risikomanagements geschaffen wird und ob dieser methodische Schritt einen tatsächlichen Mehrwert bietet gegenüber der vergleichenden Einzelbetrachtung beider Komponenten. Bei der Beantwortung der Frage ist zwischen zwei verschiedenen Anwendungsfällen zu unterscheiden.

Verzichtet man auf die Überlagerung zu einem Risikowert, beschränken sich die Anwendungsmöglichkeiten des Kartenwerks auf die objektbezogene Information und Aufklärung der Bürger bezüglich ihrer individuellen Gefährdungslage. Damit

steht vorrangig das exponierte Einzelobjekt im Fokus der Risikobetrachtung. In der weiteren Vorgehensweise hat der potenziell Betroffene durch eine eigene Vulnerabilitätsbetrachtung (siehe Objektanalyse Abschnitt 4.3.3.5) die individuelle Risikobewertung zu vervollständigen. Die Verpflichtung zur finalen Risikobewertung wird somit auf den Bürger und Gebäudeeigentümer übertragen.

Parallel zur objektbezogenen Information sollen jedoch für ein größeres Untersuchungsgebiet die potenziellen Risikobereiche und –schwerpunkte identifiziert werden, um entscheiden zu können, wo mit welcher Priorität auf kommunaler Ebene Vorsorge- und Schutzmaßnahmen zu ergreifen oder zumindest weiterführende Risikountersuchungen durchzuführen sind. Daneben bedarf es auch im Sinne einer Einzelobjektbewertung relativer Risikobetrachtungen für den großen Bestand an öffentlichen Gebäuden im Verantwortungsbereich der Kommune, um auch hierfür Handlungsprioritäten festzulegen. Drittens sind für Fragestellungen der Betriebsführung auf kommunaler Ebene oder für präventive Einsatzplanungen der Feuerwehren häufig gebietsweite Risikoinformationen erforderlich. Für solche Zielsetzungen bedarf es eines klar definierten Risikowertes aus der Überlagerung von Gefährdung und Schadenspotenzial.

Dabei ist es zweitrangig, dass der Risikowert und die dargestellte Risikoklasse größeren Unsicherheiten unterliegen als die Information zur Gefährdungslage. Diese Diskrepanz lässt sich dadurch etwas kompensieren, dass in der Risikokarte die Gefährdungsklasse selbst mit dargestellt wird und somit als unmittelbare Information erhalten bleibt. Der große Vorteil der hier vorgestellten Methodik liegt zweifelsfrei in der einfachen Anwendung auf größere Untersuchungsgebiete bei vergleichsweise geringem Aufwand und der damit verbundenen Möglichkeit einen schnellen, ersten Gesamtüberblick über eine kommunale Risikolage zu erhalten.

Die **Plausibilisierung** der Risikoanalyseergebnisse stellt in Ermangelung einer auf Messparametern gestützten Validierung einen wichtigen und obligatorischen Arbeitsschritt der topografischen Gefährdungs- und Risikoanalyse dar, der nach verschiedenen Ansätzen durchgeführt werden kann und sollte. Die beschriebenen Vorgehensweisen sind nicht als Alternativkonzepte zu verstehen, sondern sollten aufgrund ihrer unterschiedlichen Ausrichtung (ereignisbezogen – ereignisübergreifend; gebietsweit – einzelfallbezogen) in Kombination und gegenseitiger Ergänzung angewendet werden.

Die Erkenntnisse aus der Anwendung im Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken) werden nachfolgend kurz bewertet.

Bei der **ereignisübergreifenden Plausibilisierung** lässt sich festhalten, dass sich die lokalisierbaren Feuerwehreinsatzstellen bei Starkregenüberflutungen der Vergangenheit sehr gut bis zufriedenstellend anhand der Gefahrenkarte nachvollziehen und bestätigen lassen. Die Plausibilisierung ist jedoch beschränkt auf eine Bewertung der Gefährdungssituation.

Bei der **ereignisbezogenen Plausibilisierung** der Gefährdungsbereiche anhand eines Vergleichs der Feuerwehreinsätze eines historischen Ereignisses mit den Ergebnissen eines statischen Volumennachweises sind methodisch bedingte Unsicherheiten und Einschränkungen in Kauf zu nehmen, u. a.

- aufgrund der fehlenden Berücksichtigung des tatsächlichen zeitlichen Niederschlags- und Abflussgeschehens:
Die Untersuchungen (Schmitt und Scheid 2014) haben gezeigt, dass Stundenwerte des Gebietsniederschlags, wie sie aus den Radarmessungen vorliegen, meist nicht ausreichend aussagekräftig sind, da kurze Intensitätsspitzen in den Stundensummen zu stark geglättet werden. Es sind damit auch keine pauschalen Aussagen zu kurzzeitigen Überlastungen der Kanalisation ableitbar.
- aufgrund der fehlenden Berücksichtigung des Kanalabflussbeitrags:
Der gebietsweite, pauschale Verlustansatz in mm Abflusshöhe ist nur als grobe Näherung zu verstehen und offenbart große Ergebnissensitivitäten. Die Abflussbeiträge des Kanalnetzes müssten stattdessen sowohl ereignisspezifisch als auch räumlich variabel festgelegt werden. Ohne die Ergebnisse aus Kanalnetzrechnungen, die als entsprechende Variantensimulationen durchgeführt wurden, lassen sich solche Festlegungen aber nur schwer treffen. Pauschale Abflussbeiträge der Kanalisation sollten sich jedoch ungefähr an den Bemessungshäufigkeiten für Entwässerungssysteme orientieren und eher defensiv gewählt werden (z.B. für $n = 1,0 \text{ a}^{-1}$ oder $n = 0,5 \text{ a}^{-1}$). Die Fragestellung, bis zu welchem Abflussbeitrag der Kanalisation die jeweiligen Feuerwehreinsätze noch plausibel auf das lokale Überflutungsbild zurückgeführt werden können, lässt sich nur sehr grob beantworten, auch, weil nur einige wenige Einsatzmeldungen für die Auswertung eines bestimmten Gefährdungsbereichs zur Verfügung stehen.
- aufgrund der nur unzureichenden Möglichkeiten zur methodischen Berücksichtigung des Senkenüberlaufs nach Vollfüllung:
GIS-technisch lassen sich die Überlaufvolumina zwar einfach bilanzieren; eine methodische Umsetzung der Senkenvernetzung, mit der eine rechnerische Weitergabe des Überstauvolumens an die Unterliegensenken abgebildet werden kann, ist ebenfalls grundsätzlich möglich. Dies ist jedoch nur mit einem erheblichen Mehraufwand in der Bearbeitung verbunden, was dem grundsätzlichen Ansinnen der GIS-basierten Analyse widerspricht. Aber selbst eine solche Berücksichtigung erlaubt nur eine grobe stationäre Annäherung an den tatsächlichen Prozess.

Insgesamt ist die Aussagefähigkeit der ereignisbezogenen Plausibilisierung anhand von Feuerwehreinsätzen begrenzt und sollte nicht alleinig angewendet werden. Denn es fehlt neben den genannten, methodisch bedingten Unsicherheiten bzgl. der

historischen Ereignisse im Allgemeinen die notwendige, gebietsweite Detailkenntnis zur Ereignisausprägung.

Hinsichtlich der **einzelfallbezogenen Plausibilisierung** zeigen Untersuchungen von drei unterschiedlichen Beispielbereichen des Untersuchungsgebiets 1, dass es wichtig ist, neben hinlänglich bekannten auch rein analytisch identifizierte Überflutungsgebiete zu bewerten. Gerade solche Beispiele repräsentieren den typischen und am häufigsten anzutreffenden Fall, der auf Grundlage der topografischen Gefährdungsanalyse und Risikobewertung ausgewiesen wird. Die Umstände, die dafür verantwortlich sind, dass es in diesen Bereichen bislang noch keine tatsächlichen Überflutungsschäden gab, sind Gegenstand weiterer Analysen, ggf. auch im Rahmen von Modellierungen.

Die Untersuchungen in (Schmitt und Scheid 2014) bestätigen, dass über die GIS-basierte topografische Gefährdungsanalyse wertvolle Informationen gewonnen werden können, allein schon hinsichtlich der Identifikation und Abgrenzung von Senken und ihren zugehörigen Einzugsgebieten, die sich in der Regel kaum oder nur unzureichend allein anhand von Ortsbegehungen erkennen lassen.

Umgekehrt zeigt die Plausibilisierung ausgewiesener Gefahren entlang von Flutachsen und Fließwegen, dass die Ergebnisse GIS-gestützter Analysen hier unscharf bleiben und nur durch entsprechende Ortsbegehungen oder entsprechend detaillierte 1D/2D-Überflutungsberechnungen abgesichert werden können.

Beispielsweise ergeben sich Überflutungsrisiken für einzelne Gebäude aufgrund der Gestaltung des Straßenraums und der angrenzenden Bebauungsstruktur, wenn diese etwa auf tieferem Geländeniveau als der Straßenraum liegt. Da solche Sachverhalte methodisch unberücksichtigt bleiben, sollte im Zuge der Plausibilisierung eine kategoriale Risikobewertung der gesamten Bebauung entlang von Hauptfließwegen oder Flutachsen, ungeachtet der ermittelten Expositionen, durchgeführt werden.

8 Gesamtdiskussion

Zu dem in Abschnitt 4 vorgestellten Gesamtkonzept einer GIS-basierten Starkregen-Risikoanalyse wurden die wichtigsten Detailfragen der Gefährdungsanalyse, der Schadenspotenzialanalyse sowie der Risikobewertung an konkreten Anwendungsbeispielen untersucht. Die Ergebnisse wurden jeweils am Ende der Abschnitte 4 bis 7 zusammengefasst und im Detail bewertet.

Vorliegend wird in Gesamtbetrachtung aller Untersuchungen zusammenfassend diskutiert, wie und im welchem Ausmaß das ermittelte Überflutungsrisiko von den beiden Einflussgrößen Gefährdung und Schadenspotenzial bestimmt wird. Dabei wird neben dem Einfluss der Methodik vor allem auf die Datenverfügbarkeit und die daraus resultierenden Aussagefähigkeiten eingegangen.

Abschließend werden Handlungsempfehlungen und Hinweise für die Durchführung einer Starkregen-Risikoanalyse formuliert.

8.1 Einflussgröße Gefährdung

Die Aussagefähigkeit der **topografischen Gefährdungsanalyse** wird maßgeblich von der Qualität des erzeugten DOM als zentraler Datenbasis für die Ermittlung von Senken und Fließwegen geprägt. Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen die hervorgehobene Bedeutung der Auflösung des Digitalen Geländemodells, aber auch seiner methodischen Weiterverarbeitung.

Die mit dem bundesweit verfügbaren DGM1 verfügbare Auflösung wird als ausreichend hoch angesehen, um eine im Rahmen der Genauigkeitsansprüche zuverlässige Gefährdungsanalyse zu ermöglichen. Selbstverständlich sind im Sinne der Ergebnisverbesserung je nach Verfügbarkeit höher aufgelöste DGM (beispielsweise DGM1L in Nordrhein-Westfalen) zu bevorzugen. Mit Rasterweiten von 0,5 m oder gar 0,25 m ließen sich vor allem im Grenz- und Übergangsbereich zwischen Gelände und Gebäudebestand Verbesserungen erzielen: Einerseits bestehen eine bessere Chancen, kleinräumige Gebäudegeometrien (Treppenabgänge, Lichtschächte, etc.) höhenmäßig zu erfassen. Andererseits vermeidet eine hohe DGM-Auflösung bei der Rasterung das „Verschmelzen“ eng benachbarter Gebäude zu einem einzigen Abflusshindernis.

In der weiteren DGM-Aufbereitung zum DOM (i. W. Interpolation, Gebäudeimplementierung, Brückenelimination) und insbesondere der erforderlichen Vorglättung und Senkenevaluation liegen erhebliche Fehlerpotenziale für das Bewertungsergeb-

nis. Diese lassen sich jedoch durch eine entsprechend sensible Festlegung der zugehörigen Parameter und Einflussgrößen und kritische Überprüfung des erzeugten DOM vermeiden oder eingrenzen. Entsprechende Empfehlungen hierzu sind in Abschnitt 5.2.2.3 formuliert.

Bei der Aussagefähigkeit der auf dieser Grundlage ermittelten Gefahrenbereiche für Starkregenüberflutungen muss zwischen Senkenlagen und Fließwegen unterschieden werden.

Die topografische Gefährdungsanalyse liefert methodisch bedingt keine adäquate Abbildung hydraulischer Prozesse und kann die räumliche und vor allem zeitliche Dynamik des Überflutungsprozesses methodisch nicht zu einer Gefährdungsinformation weiterverarbeiten. Dies betrifft in Konsequenz vor allem die Aussagegüte der dynamischen Gefahrenkomponenten, also der sich bei Starkregen ausbildenden Fließwege und Flutachsen, aber auch des Senkenüberlaufs nach Vollfüllung. Die ausgewiesenen Gefahrenbereiche entlang der Fließwege stellen unabhängig vom gewählten Akkumulationsalgorithmus oder der festgelegten Breitenausdehnung nur „statische“ Ersatzgrößen dar.

Demgegenüber sind die Gefahreninformationen im Bereich der Senken zuverlässiger. Sie sind zunächst nur auf das DOM zurückzuführen und als vergleichsweise „hydrostatische“ Gefahrenanteile, in denen sich das Oberflächenwasser sammelt und aufstaut, methodisch besser abbildbar. Unsicherheiten ergeben sich dafür eher bei der weiteren Differenzierung und Klassifizierung der Gefährdung. Aufgrund des fehlenden Lastfallbezugs über ein Referenzstarkregenereignis ist die Überflutungsgefahr im relativen Vergleich der Senken und als abgestufte Zonen innerhalb der Einzelsenken anhand geeigneter Indikatoren (Senkenparameter) abzuschätzen.

Insgesamt liefert die topografische Gefährdungsanalyse entsprechend der ihr zugeordneten Intention einer Ersterkundung (Screening) von Gefährdungsbereichen einen zuverlässigen und – je nach Umsetzungsgrad weiterer Analysen - essenziellen Beitrag zur Risikobewertung. Ihre Ergebnisse sind aufgrund der fehlenden Modellierung und des fehlenden Bezugslastfalls sicherlich unspezifischer und mit größeren Unsicherheiten behaftet als simulationsgestützte Methoden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sie in der Gefahrenkarte zumindest bezüglich der Senken einen Worst-Case-Überblick geben, der den weiterführenden Gesamtprozess der Risikoanalyse und -kommunikation unterstützt und erleichtert. Die mögliche Überschätzung des Überflutungsrisikos durch zu viele, kleinräumige Senkenbereiche (aufgrund einer defensiven Vorglättung und Evaluation) wird als unproblematisch angesehen, da diese bei einer sachgerechten Gefahrenklassifikation auch nur als wenig relevant eingestuft werden. Es kann hierbei höchstens zu Darstellungsnachteilen im Kartenwerk kommen, wenn die dargestellte Senkendichte zu groß ist.

8.2 Einflussgröße Schadenspotenzial

Eine der größten Herausforderungen bei der Bewertung von Starkregenrisiken liegt in einer sachgerechten und fundierten **Analyse der Schadenspotenziale** im Betrachtungsraum. Die Schwierigkeiten dieser Teilaufgabe ergeben sich vorrangig aus einer unzureichenden Daten- und Informationsgrundlage, aber auch aus dem Erfordernis, eine komplexe, nur ungenügend quantifizierbare Größe methodisch stark zu vereinfachen und auf ein handhabbares Maß zu reduzieren. Erschwerend kommt hinzu, dass die Analysen auf mikroskaliger Ebene (Objektebene) erforderlich sind.

Zunächst ist es wichtig festzuhalten, dass die Beschreibung eines Überflutungsrisikos definitionsgemäß über die Bewertung der Objektvulnerabilität erfolgen müsste. Ein alleiniger Bezug auf das mögliche Schadensausmaß, das eine einzelne oder die Gesamtheit an Starkregenüberflutungen verursacht, reicht nicht aus. Denn der einzelne Betroffene macht den Umgang mit seinen individuellen Überflutungsrisiken ebenso von seiner Schadensanfälligkeit und seiner Bewältigungskapazität, also seinem Vermögen, sich von einem erlittenen Schaden zu erholen, abhängig. Zur Quantifizierung und Bewertung der beiden Komponenten fehlen jedoch geeignete Parameter und die zugehörige, adäquate Datengrundlage.

Der Bezug auf das Schadenspotenzial stellt somit eine pragmatische Ersatzlösung dar, die sich methodisch vereinfacht umsetzen lässt, jedoch aufgrund der Vielschichtigkeit des Schadensbegriffs ebenfalls großen Unsicherheiten unterliegt. Der methodische Ansatz, das Schadenspotenzial von Gebäuden anhand ihrer Nutzungsart zu bewerten, ist grundsätzlich sachgerecht, da mit der Nutzungsart eine Vielzahl schadensbestimmender Objekteigenschaften verbunden sind (Gebäudecharakteristik, Inventar, Personenaufenthalte, Verhaltensweisen, etc.). Mit den ALKIS®-Objektwertarten ist zwar eine umfangreiche und auch objektive Datengrundlage zur Gebäude- oder Flächennutzung vorhanden. Dennoch kann diese nur in grober Annäherung zur Abschätzung von Schadenspotenzialen verwendet werden, weil ihre Kategorisierung der immensen Objektvielfalt innerhalb einer Nutzungsart nicht gerecht wird. Die Objektvielfalt ermöglicht zudem hohe, subjektive Freiheitsgrade bei der Bewertung und Klassifizierung des Schadenspotenzials.

Die hier vorgestellten Ansätze zur Schadenspotenzialanalyse zeigen am konkreten Fallbeispiel, dass unter Einbeziehung weiterer Bewertungskriterien zumindest eine bessere Objektivierung des Bewertungsprozesses erreicht werden kann. Die hierzu vorgeschlagene differenzierte Bewertung des Schadenspotenzials nach verschiedenen Vulnerabilitätsdimensionen ist zu empfehlen, idealerweise anhand charakteristischer Schadenstypen.

Die Bewertungsunsicherheiten aufgrund der sehr breiten Streuung der Objekteigenschaften bei gleicher Nutzungsart verbleiben natürlich. Diese ließen sich nur über eine Verfeinerung und stärkere Differenzierung der Datengrundlage reduzieren. Hierzu wären neben der ALKIS®-Information weitere, detailliertere Datenbestände in

die Bewertung einzubeziehen, die jedoch bislang nicht flächendeckend und frei verfügbar sind. Hierunter fallen beispielsweise georeferenzierte Verbraucherdaten, wie sie von kommerziellen Datenanbietern inzwischen mit großer Detailtiefe für die unterschiedlichsten Anwendungs- und Fragestellungen, meist jedoch zu Marketing- und Konsumforschungszwecken, bereitgestellt und vermarktet werden. Ihr Umfang und ihre Bedeutung nehmen im Zuge der voranschreitenden Digitalisierung unter dem Schlagwort *big data* sehr schnell und stetig zu. Neben unmittelbar personenbezogenen Informationen werden aus diesen Datenpools u. a. auch wirtschaftliche oder sozio-kulturelle Randbedingungen, Lebens- und Verhaltensweisen (Milieudaten) abgeleitet, die u. a. auch Hinweise auf Schadenspotenziale liefern und sogar Vulnerabilitäten näher beschreiben und quantifizieren könnten. Ihre praktischen Verwendungsmöglichkeiten beschränken sich jedoch bestenfalls auf Forschungsfragestellungen, da sowohl der Beschaffungs- als auch der Auswertungsaufwand für gebietsweite Betrachtungen sehr hoch sind. Zudem steht eine damit einhergehende „Fremdbewertung“ individueller Vulnerabilitäten und Schadenspotenziale der grundsätzlichen Zielsetzung einer Risikoanalyse, potenziell Betroffene aufzuklären und zum aktiven, vorsorgenden Handeln zu bewegen, entgegen.

Letztlich verbleiben bei der Schadenspotenzialbewertung größere Unsicherheiten als bei der Gefährdungsanalyse. Diese sind datentechnisch wie methodisch begründet und beeinflussen unmittelbar auch die generierte Risikoinformation. Es ist perspektivisch auch äußerst schwierig, diese Defizite auszuräumen, da sich die hierfür notwendige Datenerhebung auf den privaten Bereich bezieht.

8.3 Risikoanalyse

Aus dem Vergleich der Aussagefähigkeiten und Relevanzen von Gefährdung und Schadenspotenzial ergibt sich eine gewisse Ambivalenz in der Risikobewertung. Die in (Hauger et al. 2006) formulierte Einschätzung, dass seitens der Betroffenen Überflutungsrisiken primär von der Schadens- und Auswirkungsseite her gedacht und bewertet werden, wird geteilt. Die Vulnerabilität bzw. das Schadenspotenzial sollte daher grundsätzlich die Risikobewertung für Starkregenüberflutungen stärker prägen als die Gefährdung. Gleichzeitig sind auch die Handlungsspielräume des Einzelnen zur Vulnerabilitätsminderung bzw. Resilienzverbesserung größer als zur Gefährdungsreduktion. Schließlich vermindert eine Objektschutzmaßnahme nicht die Gefährdung, sondern primär die eigene Anfälligkeit. In Kombination dieser beiden Sachverhalte bedeutet dies, dass sich etwaige Vorsorge- und Schutzmaßnahmen bei einem eher vulnerabilitätsbetonten Risikoverständnis stärker und prägnanter als Risikominderung auswirken.

Mit Blick auf die Datengrundlage ergibt sich jedoch die Schwierigkeit, die prägende Risikokomponente Vulnerabilität am wenigsten greifbar und quantifizierbar ist. Dies bedeutet in Konsequenz, dass weitere Verbesserungen bei der Beschreibung der

Gefährdung, sei es durch weitere methodische oder technische Fortschritte (Modell- und Simulationstechnik, EDV-Systeme), nicht zwangsläufig und unmittelbar auch zu verbesserten Risikoinformationen führen. Damit ist in der Anwendungspraxis adäquat umzugehen.

Dies führt zu der Fragestellung, wie eine **Risikoanalyse** grundsätzlich zu konzipieren und hinsichtlich ihrer Ergebnisse aufzubereiten ist, damit sie ihrem praktischen Nutzen als fundamentale Informations- und Arbeitsgrundlage für die weiterführenden Prozesse des kommunalen Starkregen-Risikomanagements gerecht werden kann. In Abschnitt 7.4 wurde bereits thematisiert und erläutert, dass die Notwendigkeit besteht, Risikoinformationen zielgruppenspezifisch bereit zu stellen und dass es hierfür unterschiedlicher Formen der Ergebnisdarstellung bedarf.

Die Notwendigkeit einer gebietsweiten Risikokarte mit den Resultaten einer mathematischen Synthese von Gefahr und Schadenspotenzial wird nur für „interne“ Verwendungen auf kommunaler Ebene gesehen, wenn auf Grundlage eines Gesamtüberblicks zur Risikosituation einzelne Risikoschwerpunkte zu identifizieren und vor allem zu priorisieren sind. Dies gilt beispielsweise für Feuerwehren und Einsatzkräfte, die zur Optimierung der Gefahrenabwehr und ihrer Einsätze eine geeignete Risikokarte benötigen. Aber auch für kommunale Planungsaufgaben, insbesondere für die Konzeption städtebaulicher oder freiraumplanerischer Beiträge zur Überflutungsvorsorge, sind die Überflutungsrisiken des Planungsgebiets anhand einer Risikokarte zu bewerten. Demnach sind nur auf dieser Ebene die unterschiedlichen Aussagefähigkeiten von Gefährdungs- und Schadenspotenzialanalyse relevant.

Für die Risikokommunikation mit privaten Adressaten oder mit der Öffentlichkeit ist das Erfordernis einer Risikosynthese nicht zwingend gegeben. Hier reicht es in der Regel aus, vorrangig Gefährdungsinformationen bereitzustellen, aus denen auf der privaten Adressatenebene individuelle Risikoinformationen abzuleiten sind.

8.4 Empfehlungen und Hinweise

In Zusammenfassung ergeben sich für die Durchführung einer Starkregen-Risikoanalyse die nachfolgenden Handlungsempfehlungen und Hinweise.

Topografische Gefährdungsanalyse

- Die verwendete DGM-Auflösung sollte, sofern verfügbar, mehrere Datenpunkte pro Quadratmeter aufweisen, mindestens jedoch dem deutschlandweit verfügbaren Standard DGM1 entsprechen.
- Der ergebnissensitive Prozess der DOM-Erstellung, insbesondere die Vorglättung, ist hinsichtlich der Senkenevaluation und Fließwegidentifikation nach unterschiedlichen Kriterien und parameterfestlegungen durchzuführen.

-
- Die Senkenevaluation sollte auf Grundlage einer möglichst schwachen Vorglättung erfolgen. Es wird hierzu eine Mindestsenkentiefe von 10 cm und bzgl. der Senkenauswahl als Gefährdungszone ein Mindestvolumen von 2 m³ als sachgerecht angesehen. Allerdings sind diese Empfehlungen stets im Anwendungsfall kritisch zu prüfen.
 - Die Fließwegidentifikation bedarf einer weitreichenden DOM-Vorglättung, die nur Senken mit ausreichend großer Retentionshöhe beibehält, um das methodisch nicht abbildbare Überströmen vollgefüllter Senken adäquat zu berücksichtigen. Als Orientierungswert kann hierfür eine Retentionshöhe von mindestens $h_{Ret} = 200$ mm angegeben werden.
 - Die Gefahrenklassifizierung sollte hinsichtlich der Senken über die Senkengröße (Kombination aus Senkenvolumen und Retentionshöhe) und hinsichtlich der Fließwege über die angeschlossene abflusswirksame Fläche erfolgen. Es wird zusätzlich eine räumliche Differenzierung der Gefährdung durch Senkenzonierung sowie unterschiedlich breite Fließwegkorridore empfohlen.

Schadenspotenzialanalyse

- Der methodische Ansatz einer nutzungsartbezogenen Schadenspotenzialbewertung ist sachgerecht und aufgrund der erzielbaren Informationstiefe für flächendeckende Erstbewertungen zu empfehlen. Er ist jedoch nur als Ersatz für die eigentlich erforderliche Vulnerabilitätsbewertung anzusehen und für eine Übertragung auf die Einzelobjektebene zu unsicher. Hierfür sind objektbezogene Detailanalysen im Bedarfsfall erforderlich.
- Der ALKIS®-Objektartenkatalog bietet eine umfangreiche Bewertungsgrundlage, die jedoch aufgrund der starken Aggregation vielfältiger Objekteigenschaften nur für grobe Schadenspotenzialabschätzungen nutzbar ist. Derzeit ist jedoch keine bessere flächendeckend verfügbare Datenbasis verfügbar.
- Zur objektiveren SP-Bewertung sollte eine Differenzierung nach Vulnerabilitätsdimensionen (physisch-human, physisch-nonhuman, sozio-kulturell, ökonomisch, ökologisch) erfolgen, um auch eine differenziertere Risikobeurteilung zu erhalten.
- Der vorgestellte Ansatz 3 einer SP-Bewertung anhand definierter Schadenstypen (Abschnitt 6.2.3) wird zur Anwendung empfohlen, auch wenn dieser noch einer weiteren empirischen Absicherung bedarf. Er ermöglicht durch die systematische Einschätzung von Ausprägung und Aufkommensrelevanz charakteristischer Schadensbilder eine eng geführte und vergleichsweise detailierte Schadenspotenzialbewertung.
- Kritische Infrastrukturen sollten kategorisch mit höchster Schadenspotenzialklasse eingestuft und so für die Risikobewertung gesondert markiert werden.

Risikoanalyse

- Die Ergebnisse der Risikobeurteilung für Starkregenüberflutungen sind zielgruppenspezifisch aufzubereiten und zu visualisieren.
- Eine Risikokarte als mathematische Überlagerung von Gefährdung und Schadenspotenzial wird nur als interne Arbeits- und Entscheidungsgrundlage der kommunalen Akteure und Planungsressorts benötigt. Hierzu wird der Additionsansatz empfohlen.
- Die externe Aufklärungsarbeit und Kommunikation mit potenziell Betroffenen sollte anhand einer Expositionskarte erfolgen, die auf Objektebene die Gefährdungssituation und potenzielle Gebäudebetroffenheit visualisiert. Es bedarf der ergänzenden Risikobeurteilung durch die Gebäudeeigentümer.

9 Schlussfolgerungen und Ausblick

9.1 Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

Erkenntnisse zur Anwendung der topografischen Gefährdungsanalyse

Anhand der Detailuntersuchungen zur **topografischen Gefährdungsanalyse** konnte gezeigt werden, dass es unbedingt erforderlich ist, sich eingehend mit den Freiheitsgraden bei der Festlegung der verschiedenen Eingangsgrößen, u. a. der Gefährdungsindikatoren, zu befassen, um fallspezifisch sachgerechte Ansätze treffen zu können. Vor allem die Prozessschritte der DOM-Aufbereitung und der Senkenevaluation beeinflussen maßgeblich die resultierenden Gefährdungsinformationen.

Während der Einfluss unterschiedlicher Interpolationsansätze von eher untergeordneter Bedeutung ist, wirken sich die Festlegungen zur DGM-Vorglättung unmittelbar und teils gravierend auf die Ergebnisse der Gefährdungsanalyse aus. Eine wichtige Erkenntnis dabei ist, dass es zwar sachgerecht erscheint, über Mindestwerte der Senkentiefe und des Senkenvolumens Glättungen vorzunehmen, dass aber die zugehörigen Glättungswerte nur anwendungsspezifisch festgelegt werden können. Als weitere wichtige Empfehlung bleibt in diese, Zusammenhang festzuhalten, dass die Gefährdungsbereiche von Senken und Fließwegen über unterschiedliche Vorglättungsansätze zu generieren sind.

Die Detailuntersuchungen zur topografischen Gefährdungsanalyse haben ferner gezeigt, dass es diverse Teilprozesse und Aspekte gibt, wie z. B. der Senkenüberlauf nach Vollfüllung, Abflussbeiträge der Kanalisation oder die Einbindung weiterer geomorphologischer Kenngrößen (topografische Indices), die sich durch entsprechende GIS-Operationen in die Gesamtmethodik einbinden ließen. Allerdings ginge dies zulasten einer schnellen und einfachen Handhabung, was der generellen Intention der Methode widerspricht.

Insgesamt gesehen steht mit der topografischen Gefährdungsanalyse ein Werkzeug zur Verfügung, das im Rahmen der ihr zgedachten Verwendung zur Identifikation und Erstbewertung von Gefährdungsbereichen für Starkregenüberflutungen verlässliche Aussagefähigkeiten ermöglicht. Trotz der im Vergleich zur Simulation geringeren Aussagetiefe der GIS-gestützten topografischen Analyse und den qualitativen Gefährdungsinformationen steht zumindest für die ersten Prozessschritte des Starkregenrisikomanagements eine sachgerechte, wenn auch als Worst-Case-Ergebnislage zu deutende Informations- und Kommunikationsgrundlage zur Verfügung.

Erkenntnisse zur Anwendung der Schadenspotenzialanalyse

Die Bewertung von **Objektvulnerabilitäten**, wie sie definitionsgemäß für eine Risikoüberlagerung mit dem Gefährdungspotenzial benötigt wird, lässt sich aufgrund der öffentlich verfügbaren Daten nicht darstellen. Es fehlen hierfür vor allem quantifizierbare Angaben zur Objektanfälligkeit und zur Bewältigungskapazität. Aber selbst die Bewertung des **Schadenspotenzials**, das als dritte Komponente der Vulnerabilität zur methodischen Ersatzgröße wird, lässt sich nur limitiert bewerten. Auf mikroskaliger Ebene (Einzelobjektebene) erfolgt dies aufgrund der verfügbaren Datengrundlage derzeit und bis auf weiteres anhand einer pauschalen Klassifizierung, zu der liegenschaftsbezogene Nutzungsdaten herangezogen werden, die sich mit weiteren Objektinformationen, beispielsweise zur Bauweise oder Unterkellerung, modifizieren lassen. Die nutzungsbezogene Bewertung ist methodisch bedingt unsicher, weil eine Vielzahl an Einzelobjekten mit zwar gleicher Nutzung, jedoch möglicherweise stark unterschiedlichen spezifischen Eigenschaften zusammengefasst wird. Somit besteht ein grundsätzlicher Bedarf an objektbezogenen Detailanalysen, die jedoch durch oder in enger Kooperation mit den Gebäudeeigentümern durchzuführen wäre. Eine weitere Schwäche dieser Bewertungsmethode liegt in der hohen Abhängigkeit von subjektiven Einschätzungen des Bearbeiters, der sich an Leitfragen beispielsweise nach dem zu erwartenden charakteristischen Schadenspotenzial und dem mittleren Schutzbedürfnis eines Objekts bzw. einer ALKIS®-Objektwertart orientiert.

Mit der hier vorgestellten Methode lässt sich zu einem gewissen Grad diese Bewertung objektivieren. Sie beinhaltet eine nach Vulnerabilitätsdimensionen differenzierte Schadenspotenzialklassifizierung, die durch die Verwendung definierter, charakteristischer Schadenstypen als Hilfsgrößen zusätzlich konkretisiert wird, womit die Bewertung enger geführt werden kann. Dieser Ansatz bedarf noch weiterer empirischer Absicherung, etwa bezüglich der Kategorisierung der Schadenstypen und der allgemeinen Zuordnung von Relevanzen und Ausmaßen. Letztlich wäre es wünschenswert, in einem einmaligen Arbeitsprozess einen Katalog an ALKIS®-Objektwertarten mit zugehörigen Schadenstypbewertungen zu erstellen und anzubieten, der standardisierte Klassifizierungen ermöglicht.

Insgesamt lässt sich über die ALKIS®-Objektwertarten verfügbare Datenqualität und mit den beschriebenen methodischen Ansätzen eine zufrieden stellende qualitative Verbesserung der Schadenspotenzialbewertung erzielen. Die insgesamt verbleibenden Unsicherheiten sind bei der weiteren methodischen Verarbeitung zum Risiko entsprechend zu berücksichtigen.

Ungeachtet der Abbildungsdefizite der Vulnerabilität ist zu beachten, dass Risikobewertungen möglichst vulnerabilitätsbezogen erfolgen sollten. Die Fragen nach dem möglichen Schadensausmaß, das man erleiden kann und den Präventions- und Schutzmaßnahmen stehen, zumindest auf Objektebene, im Vordergrund. Überflutungsgefährdungen werden in diesem Kontext tendenziell als Konkretisierung einer

unweigerlichen Naturgefahr (Starkregenabfluss) mit potenziell schädlichen Wirkungen als schwer abwendbar hingenommen.

Schlussfolgerungen für das kommunale Risikomanagement

Die festgestellte Diskrepanz in den Aussagefähigkeiten von Gefährdungs- und Schadenspotenzialanalyse und die daraus resultierenden Schwierigkeiten in der Darstellung konsistenter **Risikoinformationen** verdeutlichen das Erfordernis, die starkregenbezogene Überflutungsvorsorge als kommunalen Gemeinschaftsauftrag anzunehmen und auf verschiedenen Handlungsebenen zu bearbeiten.

Über eine zielgerichtete, sachgerechte Kommunikation müssen vor allem die potenziell Betroffenen (Bürger, Gebäudeeigentümer und –nutzer) selbst zu Akteuren der Risikobewertung werden. Dies ergibt sich zum einen aufgrund bestehender Informationsdefizite zur individuellen Objektvulnerabilität (Anfälligkeiten, Schadenspotenziale und Bewältigungskapazitäten), aber zum anderen und wesentlich auch aufgrund der Handlungsmöglichkeiten des Einzelnen für seinen Zuständigkeitsbereich. Dies bedeutet selbstverständlich nicht, dass die Risikovorsorge für Starkregenüberflutungen vorrangig dezentral und flurstückbezogen leistbar ist. Es bedarf natürlich des häufig eingeforderten Zusammenwirkens auf kommunaler und privater Ebene mit gemeinsamen Vorsorgebeiträgen, wovon allerdings die Maßnahmen auf dem Flurstück oder am gefährdeten Risikoobjekt zu Prävention und Objektschutz, aber auch zu wassersensibler Umgestaltung, Verhaltens- und Nutzungsanpassung, einen unmittelbar wirksamen, effektiven Beitrag leisten.

Ein adressatspezifisch aufbereitetes Kartenwerk bildet hierfür die notwendige Informations- und Kommunikationsbasis und ermöglicht den Einstieg in ein präventives kommunales Risikomanagement. Die mit dem hier vorgestellten Gesamtkonzept einer Starkregen-Risikoanalyse erzeugten Kartendokumente, bestehend aus einer Gefährdungskarte mit Gebäudeexposition (Abschnitt 5.5), mehreren nach Vulnerabilitätsdimensionen differenzierenden Schadenspotenzialkarten (Abschnitt 6.3) und einer Risikokarte (Abschnitt 7.2) konkretisieren und ergänzen die in Merkblatt DWA-M 119 formulierten Empfehlungen zur Ergebnisdarstellung. Sie werden der Intention und dem Genauigkeitsanspruch einer ersten Gefährdungs- und Risikoeinschätzung als Informationsschnittstelle zwischen Kommune und Bürger vollumfänglich gerecht.

„Risikokommunikation“ darf in diesem Zusammenhang nicht verkürzt als kommunal geführte Risikoinformation fehlinterpretiert werden, auch wenn sehr häufig davon die Rede ist, dass Bürger über die bestehenden Überflutungsrisiken aufzuklären sind. Mit der Feststellung, dass in erster Linie der potenziell Betroffene seine individuelle Vulnerabilität und damit Überflutungsrisiko, dem er ausgesetzt ist, bewerten kann, ist der von kommunaler Seite geführte Dialog zunächst eine Gefährdungs-kommunikation, die sich durch entsprechende Beiträge und Antworten des adres-

sierten Bürgers oder Gebäudeeigentümers zur Risikokommunikation weiterentwickeln muss.

Eine kommunale Risikokarte kann Anspruch an eine Risikoinformation für private Adressaten nicht angemessen und sachgerecht bedienen, weil die darin enthaltene Risikoeinschätzung „von außen“ bezogen auf das private Einzelobjekt unsicher ist. Insofern ist eine Gefährdungskarte mit Informationen zur Gebäudeexposition hierfür das geeignetere Werkzeug und im Sinne dessen, was bereits vereinzelt an Aufklärung und Information geleistet wird (geomer 2018; Lippeverband 2018; StEB 2018).

Es ist sicherlich wichtig, dass das Kartenwerk verantwortungsvoll, d.h. möglichst ohne Überzeichnung von Risiken zur Information und Sensibilisierung eingesetzt wird. Daher bedarf es einer sachlich fundierten Ergebnisdarstellung durch verlässliche Karteninhalte. Dennoch lässt der Prozess der Risikokommunikation auch bis zu einem gewissen Grad qualitative Informationen zu, ohne dass die Zielverfolgung leidet. Der Risikodialog kann in einer Anfangsphase durch diese Unverbindlichkeit sogar befördert werden, weil der Adressat noch stärker sensibilisiert wird für die methodisch bedingten Bewertungsunsicherheiten und die Variabilität und Unvorhersagbarkeit Naturphänomens Starkregen und seiner Abflüsse im urbanen Raum.

Schlussfolgerungen zu Datenerfordernissen und Aussagefähigkeiten

In Gesamtschau und Zusammenfassung der oben erläuterten Erkenntnisse bleibt festzuhalten, dass die Bewertung der beiden methodischen Schwerpunkte Gefährdungs- und Schadenspotenzialanalyse hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeiten deutlich unterschiedlich ausfällt. Bei der topografischen Gefährdungsanalyse wird die Aussagegüte des Verfahrens sehr stark von den methodischen Randbedingungen und Einschränkungen bestimmt, da es z. B. weiterer GIS-Operationen und -Algorithmen bedürfte, um den Effekt der Senkenüberläufe adäquat zu berücksichtigen. Natürlich bestehen auch hier datentechnisch bedingte Einschränkungen, die sich vor allem in mangelnden Optionen zur Validierung ausdrücken.

Bei der Schadenspotenzialanalyse sind grundsätzlich andere Anwendungsrandbedingungen vorherrschend: Hier besteht zu allererst ein Defizit an belastbaren Daten, die es ermöglichen, entweder Schadenspotenziale in deutlich differenzierterer Form abzubilden oder die gar eine methodische Erweiterung zu der eigentlich erforderlichen Vulnerabilitätsbewertung erlauben. Beides ist nicht der Fall, sodass auch darauf angewiesene methodische Verbesserungen ausbleiben müssen.

9.2 Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick

Die Frage nach dem erkennbaren weiteren Forschungsbedarf und weiteren Optimierungspotenzialen bei der Risikobewertung für Starkregenüberflutungen lässt sich unmittelbar aus den Schlussfolgerungen ableiten.

Erfordernis verbesserter Datengrundlagen und methodischer Weiterentwicklungen

Eine Verbesserung der Datengrundlage wird als allgemeine Voraussetzung für eine methodische Weiterentwicklung und Optimierung des Gesamtprozesses der Risikobewertung angesehen.

Hierzu ist zunächst der Bedarf an detaillierterer messtechnischer Erfassung urbaner Überflutungsereignisse zu nennen. Eine sehr einfache Form des Monitorings von bekannten Überflutungsschwerpunkten bei entsprechenden Starkregenereignissen würde (erste) Fortschritte bei der Ergebnisvalidierung zur Gefährdungsanalyse ermöglichen. Dieses gilt zunächst methodenübergreifend, hat jedoch eine besondere Bedeutung für die simulationsgestützten Verfahren der Gefährdungsanalyse.

Gleichermaßen muss das Monitoring des Überflutungsgeschehens als Ereignisnachsorge auch wertvolle Informationen zu Objektvulnerabilitäten und Schadenspotenzialen liefern, um perspektivisch die Datengrundlage für künftige Risikobewertungen zu verbessern. Mögliche Potenziale zur Erfassung und Auswertung objektbezogener Vulnerabilitätsinformationen werden beispielsweise in folgenden Punkten gesehen:

- Es sind die bereits verfügbaren Informationen objektbezogener Bewertungen, z. B. die starkregenbezogenen Detailangaben des Hochwasserpas (HKC o.J.; Hartmann und Scheibel 2016) systematisch zu sammeln und getrennt nach Gebäudeeigenschaften (Bauweisen, Nutzungsarten) auszuwerten, was zumindest die Informationslage zur Objektanfälligkeit verbessern könnte.
- Im Zuge von Baugenehmigungsverfahren für Gebäude bzw. konkret bei der Abnahme der Grundstücksentwässerungsanlagen könnten bereits präventiv Informationen zur objektspezifischen Überflutungsanfälligkeit bzw. zur Pufferkapazität erfasst werden.

Mit einer verbesserten Datengrundlage ließen sich auch der aktuell noch unzureichende Handlungsrahmen bei der Schadenspotenzialanalyse fortentwickeln und zu einer Vulnerabilitätsanalyse erweitern.

Resilienzverbesserung als Perspektive und Leitbild

Die kommunale Überflutungsvorsorge muss mit den ihr obliegenden Maßnahmen mittel- bis langfristig eine geeignete ganzheitliche Strategie zur Verbesserung der Resilienz sowohl auf kommunaler als auch objektbezogener / privater Ebene verfolgen. Dies zeigt sich u. a. auch den Handlungsoptionen und Vorsorgemaßnahmen auf privater Ebene: Die meisten getroffenen Vorsorgemaßnahmen zielen als Schutzmaß-

nahen auf eine Erhöhung der eigenen Widerstandsfähigkeit und Unempfindlichkeit gegenüber Wassereinwirkungen ab, dienen somit der Verbesserung der eigenen Resilienz, ohne dass dieser Begriff gebraucht wird. Seltener setzen objektbezogene Maßnahmen bei der Gefahrenabwehr oder -minderung an. Solche Strategien sind eher auf kommunaler, übergeordneter Ebene Erfolg versprechend.

Auf konzeptioneller Ebene stellt sich jedoch die Frage, wie sich Resilienzverbesserung anhand eines kommunalen Leitbilds beschreiben und mehr noch quantifizieren und bewerten lässt. Denn Resilienz ist begrifflich weiter zu fassen als das bloße Gegenteil der Vulnerabilität. Schließlich umfasst und beschreibt sie insbesondere auch Aktivitäten und Fähigkeiten eines Systems oder Objekts zur Verringerung der Vulnerabilität. Resilienz zeigt sich somit nicht nur in der Art und Form der Ereignisbewältigung und dem Vermögen zur Schadenskompensation und Erholung, sondern beinhaltet auch Lernfähigkeit und die Fähigkeit zur Anpassung, damit die Anfälligkeit und/oder das Schadensausmaß (Schadenspotenzial) bei künftigen Gefährdungen und Expositionen verringert wird.

Angesichts der thematisierten Schwierigkeiten bei der Abbildung und Bewertung von Vulnerabilität steht man mit der Beschreibung oder gar Quantifizierung von Resilienz vor einer noch größeren Herausforderung. Die ersten Ansätze zur Quantifizierung der Systemresilienz (siehe Abschnitt 2.1.2.5) erscheinen nur bedingt auf die Überflutungsvorsorge übertragbar, da beispielsweise die zeitliche Dimension der Leistungsstörung und damit die Schwere der Beeinträchtigung nicht greifbar ist. Hier sind weitere Forschungen und Erprobungen an konkreten Beispielen erforderlich.

Möglicherweise bedarf es zunächst einer noch stärkeren Vereinfachung des Resilienz-begriffs, auch wenn man damit zunächst der umfassenden Resilienzbedeutung nicht gerecht wird. Ein pragmatischer erster Ansatz zur Bewertung der Überflutungsresilienz wäre es, ohne Zeitbezug schlicht die Anzahl von Schadensfällen (oder deren Schadenssummen) in Relation zur Stärke und Ausprägung eines Überflutungsereignisses, beispielsweise bewertet durch den Starkregenindex, zu bewerten. Letztlich wird aber auch für ein solch einfaches Vorgehen das systematische Erfassen und Auswerten von Schadensinformationen und die Erschließung neuer Datenquellen erforderlich werden.

Wie geht es methodisch weiter? Perspektiven der Gefährdungs- und Risikoanalyse

Mit der einleitend formulierten Feststellung, dass das die gesamte Siedlungsentwässerung und damit auch die Überflutungsvorsorge im Informationszeitalter angekommen und verankert ist (Schlagworte Digitalisierung, Wasserwirtschaft 4.0, big data, smart cities), begründet sich die allgemeine Einschätzung, dass es künftig sicher bessere und vor allem umfänglichere Datengrundlagen auch für die Bearbeitung von Starkregen-Risikoanalysen geben wird.

Großes Entwicklungspotenzial wird unter anderem im Bereich der Mess- und Überwachungstechnik, insbesondere der Datenübertragungstechnik (low cost Sensorik, Niedrigenergiefunk LoRaWAN™) gesehen (Blumensaat et al. 2017). Mittelfristig werden sich sowohl Quantität als auch Qualität der Datengrundlagen deutlich verbessern, wovon grundsätzlich und im Besonderen bezüglich der Ergebnisplausibilisierung alle Methoden der Gefährdungs- und Risikoanalyse profitieren können, damit auch GIS-basierte Analysemethoden.

Auch der Einbindung und Nutzbarmachung privater Datenquellen zu Objektvulnerabilitäten und –schadenspotenzialen kommt künftig eine Schlüsselrolle zu, um stärker schadensbezogene Risikobewertungen durchführen zu können. In diesem Zusammenhang bedarf es künftig auch geeigneter Konzepte zur koordinierten und standardisierten Ereignisnachsorge, in deren Rahmen sowohl Überflutungsschäden als auch deren Ursachen systematisch und ausreichend detailliert erfasst und ausgewertet werden. Hier mangelt es derzeit noch an Handlungsanleitungen für Kommunen.

Insgesamt ist die Verbesserung der Datengrundlagen gewissermaßen als katalytischer Prozess zu begreifen, der auch Verbesserungen der Methoden anregt und zu derzeit noch nicht absehbaren Weiterentwicklungen der Werkzeuge führt. Vor diesem Hintergrund werden die GIS-gestützten Verfahren, wie sie heute angewendet werden, sehr wahrscheinlich an Bedeutung verlieren, dafür aber durch weiterentwickelte GIS-Methoden, die neue Datengrundlagen in geeigneter Weise ausschöpfen, ersetzt werden. Insofern bietet der weitreichende und umfassende Digitalisierungsprozess vielfältige Entwicklungschancen auch für das Themenfeld der Starkregen-Risikobewertung zur kommunalen Überflutungsvorsorge.

10 Literaturverzeichnis

- Adeyemo, O.J.; Maksimović, Č.; Boonya-aroonnet, S.; Leitão, J. P.; Butler, D.; Makropoulos, C. (2008): Sensitivity Analysis of Surface Runoff Generation for Pluvial Urban Flooding In: 11th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage (11ICUD). Edinburgh, Scotland, UK, 31 August - 5 September 2008. International Water Association (IWA), S. 1–10.
- Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Herausgegeben von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland. 5. verbesserte und erweiterte Auflage. Stuttgart, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- AdV (2004): Glossar zur Gestaltung der GeoInfoDok. Teilbereich DGM. Anlage 27f zu TOP 6.2 der 115. AdV-Plenumstagung. Unter Mitarbeit von AdV-Arbeitskreis Geotopographie - Projektgruppe Digitales Geländemodell, zuletzt aktualisiert am 06.04.2004.
- AdV (2007): Wissen(s)werte(s) über das amtliche deutsche Vermessungswesen. Magdeburg, zuletzt aktualisiert am November 2007, zuletzt geprüft am 06.11.2014.
- AdV (2009): ATKIS-Produktkatalog. Version 2.1. Unter Mitarbeit von AdV-Arbeitskreis Geotopographie (AK GT) (Unterlage 802R2). Online verfügbar unter <http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Standards-und-Produktblaetter/Standards-der-Geotopographie/>, zuletzt geprüft am 22.11.2016.
- AdV (2012): AdV-Festlegungen zu den INSPIRE Technical Guidance View Services version 3.1 (AdV-WMS-Profil 3.0). Version 3.0. Unter Mitarbeit von Projektgruppe GDI-Standards im Auftrag AdV-Arbeitskreis Informations- und Kommunikationstechnik.
- AdV (2013): Produktstandard für Digitale Geländemodelle (ALKIS - DGM). Version 2.1. Unter Mitarbeit von AdV-Arbeitskreis Geotopographie - Projektgruppe ATKIS-DGM/DOM (Unterlage 909R4), zuletzt aktualisiert am 27.03.2013, zuletzt geprüft am 06.06.2014.
- AdV (2015a): ALKIS-Grunddatenbestand und länderspezifische Inhalte. Unter Mitarbeit von AdV-Arbeitskreis Liegenschaftskataster.
- AdV (2015b): Die Aufgaben der AdV. Homepage. Online verfügbar unter <http://www.adv-online.de/Wir-ueber-uns/Aufgaben/>, zuletzt aktualisiert am 18.12.2014, zuletzt geprüft am 14.10.2015.
- AdV (2015c): Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok). ALKIS-Katalogwerke. ALKIS-Objektartenkatalog DLKM - Version 7.0.2.
- AdV (2015d): Katalog der tatsächlichen Nutzungsarten im Liegenschaftskataster und ihrer Begriffsbestimmungen. (AdV-Nutzungsartenkatalog). Grundlage: GeoInfoDok Version 7.0.1. Unter Mitarbeit von AdV-Arbeitskreis Liegenschaftskataster.

-
- AdV (2016a): Das AFIS-ALKIS-ATKIS-Projekt. - Sachstand der Migration in den Ländern - Webseite. Online verfügbar unter <http://www.adv-online.de/AAA-Modell/Sachstand-der-Migration/>, zuletzt aktualisiert am 29.04.2016, zuletzt geprüft am 22.11.2016.
- AdV (2016b): Produktblatt 3D-Gebäudemodelle LoD1, zuletzt aktualisiert am 31.12.2016, zuletzt geprüft am 10.08.2017.
- AdV (2016c): Produktblatt 3D-Gebäudemodelle LoD2, zuletzt aktualisiert am 31.12.2016, zuletzt geprüft am 10.08.2017.
- AdV (2016d): Produktblatt Digitale Orthophotos Bodenauflösung 20 cm und 40 cm (DOP20 und DOP40), zuletzt aktualisiert am 31.12.2016, zuletzt geprüft am 10.08.2017.
- AdV (2017a): Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS®). Webseite. Online verfügbar unter <http://www.adv-online.de/AAA-Modell/ALKIS/>, zuletzt geprüft am 22.08.2017.
- AdV (2017b): Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS). Webseite. Online verfügbar unter <http://www.adv-online.de/AAA-Modell/ATKIS/>, zuletzt geprüft am 22.08.2017.
- AdV (2017c): Produktstandard für 3D-Gebäudemodelle. Version 1.4. Unter Mitarbeit von AdV-Arbeitskreis Geotopographie - Projektgruppe 3D-Geobasisdaten (Unterlage 1071R4), zuletzt aktualisiert am 21.02.2017, zuletzt geprüft am 10.08.2017.
- AgrStatG (2010): Gesetz über Agrarstatistiken (Agrarstatistikgesetz) in der Fassung vom 17.12.2009, geändert durch Art. 13 Absatz 5 des Gesetzes vom 12.04.2012 (BGBl. I S. 579). In: *BGBl. I*, S. 3886.
- AKNZ / Akademie für Krisenmanagement, Notfallplanung und Zivilschutz e.V. (Hg.) (2014): Workshop Hochwasservorsorge hinter Deichen und Schutzeinrichtungen. Unter Mitarbeit von Jüpner, R. und Gall, C. BBK.
- Apel, H.; Thieken, A. H.; Merz, B.; Blöschl, G. (2006): A Probabilistic Modelling System for Assessing Flood Risks. In: *Nat Hazards* 38 (1-2), S. 79–100.
- Arge, L.; Chase, J. S.; Halpin, P.; Toma, L.; Vitter, J. S.; Urban, D.; Wickremesinghe, R. (2003): Efficient Flow Computation on Massive Grid Terrain Datasets. In: *GeoInformatica* 7 (4), S. 283–313.
- Balica, S. F.; Douben, N.; Wright, N. G. (2009): Flood vulnerability indices at varying spatial scales. In: *Water Science & Technology* 60 (10), S. 2571–2580.
- Balica, S. F.; Wright, N. G.; van der Meulen, F. (2012): A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. In: *Nat Hazards* 64 (1), S. 73–105.
- Balsells, M.; Barroca, B.; Becue, V.; Serre, D. (2015): Making urban flood resilience more operational: current practice. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management* 168 (2), S. 57–65.
- Barroca, B.; Bernardara, P.; Mouchel, J. M.; Huber, G. (2006): Indicators for identification of urban flooding vulnerability. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6 (4), S. 553–561.

- Bartak, V. (2009): How to extract river networks and catchment boundaries from DEM: a review of digital terrain analysis techniques. In: *Journal of Landscape Studies* (2), S. 57–68.
- Bartak, V. (2010): New computer program for digital terrain analysis In.: Symposium GIS Ostrava 2010. Ostrava, 24.-27.01.2010. VSB Technical University of Ostrava.
- Batica, J.; Gourbesville, P. (2014): Flood resilience index - Methodology and implementation In.: 11th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2014). New York City, USA, 17 - 21 August 2014. International Water Association (IWA).
- BBK / Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (Hg.) (2013): Abschätzung der Verwundbarkeit gegenüber Hitzewellen und Starkregen. Unter Mitarbeit von Bach, C., Birkmann, J., Kropp, J., Olonscheck, M., Setiadi, N., Vollmer, M. et al. BBK, Praxis im Bevölkerungsschutz, Band 11.
- BBSR / Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hg.) (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", BBSR im BBR.
- Beck, R. (2012): Konkrete Umsetzung von Maßnahmen zum Überflutungs- und Hochwasserschutz In: Pinnekamp, J. (Hg.). 13. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium. Martenushaus, Köln, 17.-18.10.2012. Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen, Aachener Schriften zur Stadtentwässerung, Band 16, 23/1-23/9.
- Berg, M.; Erdmann, G.; Hofmann, M.; Jaggy, M.; Scheringer, M.; Seiler, H. (Hg.) (1994): Was ist ein Schaden? Zur normativen Dimension des Schadensbegriffs in der Risikowissenschaft, VDF Hochschulverlag an der ETH Zürich, Dokumente / Polyprojekt Risiko und Sicherheit, Band 2.
- Beven, K. J.; Kirkby, M. J. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. In: *Hydrological Sciences Bulletin* 24 (1), S. 43–69.
- Bill, R. (2010): Grundlagen der Geoinformationssysteme. 5., völlig neu bearb. Aufl. 2009. Berlin, Wichmann.
- Birkmann, J. (2008): Globaler Umweltwandel, Naturgefahren, Vulnerabilität und Katastrophenresilienz. Notwendigkeit der Perspektivenerweiterung in der Raumplanung. In: *Raumforschung und Raumordnung* (1), S. 1–18.
- Birkmann, J.; Böhm, H. R.; Buchholz, F.; Büscher, D.; Daschkeit, A.; Ebert, S.; Fleischhauer, M.; Frommer, B.; Köhler, S.; Kufeld, W.; Lenz, S.; Overbeck, G.; Schanze, J.; Schlipf, S.; Sommerfeldt, P.; Stock, M.; Vollmer, M.; Walkenhorst, O. (2013): Glossar Klimawandel und Raumentwicklung. 2. überarbeitete Fassung. Hannover, Akademie für Raumforschung und Landesplanung, E-paper der ARL, Band 10.
- Birkmann, J.; Krings, S.; Vollmer, M.; Wolfertz, J.; Welle, T.; Kühling, W.; Meisel, K.; Wurm, M.; Taubenböck, H.; Gähler, M.; Zwenzner, H.; Roth, A.; Voigt, S.; Dech, S. (2011): Indikatoren zur Abschätzung von Vulnerabilität und Bewältigungspotenzialen. am Beispiel von wasserbezogenen Naturgefahren in urbanen Räumen. Bonn, Bundesamt

-
- für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Forschung im Bevölkerungsschutz, Band 13.
- BKG (2017): DOP-Viewer der amtlichen Digitalen Orthophotos (DOP) der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland. Online verfügbar unter http://sg.geodatenzentrum.de/web_bkg_webmap/applications/dop/dop_viewer.html, zuletzt geprüft am 14.08.2017.
- Blumensaat, F.; Ebi, C.; Dicht, S.; Hunziker, A.; Rieckermann, J.; Maurer, M. (2017): Langzeitüberwachung der Raum-Zeit-Dynamik in Entwässerungssystemen mittels Niedrigenergiefunk – ein Feldexperiment im Grossmassstab In: Muschalla, D. und Gruber, G. (Hg.). *Aqua Urbanica 2017*. Graz, 03.-04. Juli 2017. Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Technische Universität Graz, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Band 75, D1-D11.
- BMBF / Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2004): Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse (RIMAX). Online verfügbar unter <http://www.rimax-hochwasser.de>, zuletzt geprüft am 20.07.2017.
- BMBF / Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2008): Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS). Förderprogramm des BMBF: Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse (RIMAX). Förderkennzeichen 0330701 C. Unter Mitarbeit von Castro, D., Einfalt, T., Frerichs, S., Friedeheim, K., Hatzfeld, F., Kubik, A. et al.
- BMI / Bundesministerium des Inneren (Hg.) (2005): Schutz Kritischer Infrastrukturen – Basisschutzkonzept. Empfehlungen für Unternehmen. Berlin. Online verfügbar unter www.bmi.bund.de.
- BMI / Bundesministerium des Inneren (Hg.) (2007): Umsetzungsplan KRITIS des nationalen Plans zum Schutz der Informationsinfrastrukturen. Berlin.
- BMI / Bundesministerium des Inneren (Hg.) (2009): Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen. (KRITIS-Strategie).
- BMI / Bundesministerium des Inneren (Hg.) (2011a): Schutz Kritischer Infrastrukturen – Risiko- und Krisenmanagement. Leitfaden für Unternehmen und Behörden. 2. Aufl. Berlin.
- BMI / Bundesministerium des Inneren (Hg.) (2011b): Sektoren- und Brancheneinteilung Kritischer Infrastrukturen, zuletzt geprüft am 02.09.2016.
- Bollrich, G. (2000): Technische Hydromechanik. Band 1: Grundlagen. 5. Auflage. Berlin, Verlag für Bauwesen.
- Boonya-aroonnet, S.; Maksimović, Č.; Prodanović, D.; Djordjević, S. (2007): Urban pluvial flooding: development of GIS based pathway model for surface flooding and interface with surcharged sewer model In: Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (Hg.). 6e Conférence Internationale Novatech. Lyon, France, June 24-28, 2007. Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (GRAIE), S. 481-488.
- Brandt, I.; Engelschall, B. (2011): Kartieranleitung und Biotoptypenschlüssel für die Biotopkartierung in Hamburg, einschließlich der Definitionen besonders geschützter Biotop-

- pe nach § 30 BNatSchG in Verbindung mit § 14 HmbBNatSchAG und unter Berücksichtigung der Lebensraumtypen gemäß FFH-Richtlinie der EG. 2. Aufl. Hg. v. Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU). Hamburg.
- Braubach, A. (2011): Vulnerabilität der kritischen Infrastruktur Wasserversorgung gegenüber Naturkatastrophen. Auswirkungen des Augusthochwassers 2002 auf die Wasserversorgung und das Infektionsgeschehen der Bevölkerung in Sachsen und Sachsen-Anhalt. Bonn, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Forschung im Bevölkerungsschutz, Band 12.
- Braunack, J.; Pohl, R.; Jüpner, R. (2016): Experiences of using UAVs for monitoring levee breaches. In: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 46, S. 12046.
- Buck, W.; Merkel, U. (1999): Auswertung der HOWAS-Datenbank. Projektnummer HY 98/15. im Auftrag des Deutschen Verbands für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) für die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Hg. v. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik Universität Karlsruhe (IWK).
- Bürkner, H.-J. (2010): Vulnerabilität und Resilienz. Forschungsstand und sozialwissenschaftliche Untersuchungsperspektiven. Leibniz-Institut für Regionalentwicklung und Stadtplanung, Erkner (Working Paper, 43). Online verfügbar unter http://www.irs-net.de/download/wp_vr.pdf.
- Buth, M.; Kahlenborn, W.; Greiving, S.; Fleischhauer, M.; Zebisch, M.; Schneiderbauer, S. (2015): Methodische Empfehlungen für sektorale und sektorenübergreifende Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. Hg. v. Netzwerk Vulnerabilität.
- Caradot, N.; Granger, D.; Chappier, J.; Cherqui, F.; Chocat, B. (2011): Urban flood risk assessment using sewer flooding databases. In: *Water Science & Technology* 64 (4), S. 832.
- CEN (2017): Drain and sewer systems outside buildings – Sewer system management EN 752:2017.
- Cendrero, A.; Fischer, D. W. (1997): A Procedure for Assessing the Environmental Quality of Coastal Areas for Planning and Management. In: *Journal of Coastal Research* 13 (3), S. 732–744.
- Chen, A. S.; Djordjević, S.; Leandro, J.; Savić, D. A. (2007): The urban inundation model with bidirectional flow interaction between 2D overland surface and 1D sewer networks. In: *Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau* (Hg.). 6e Conférence Internationale Novatech. Lyon, France, June 24-28, 2007. Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (GRAIE), S. 465–472.
- Cherqui, F.; Belmeziti, A.; Granger, D.; Sourdil, A.; Le Gauffre, P. (2015): Assessing urban potential flooding risk and identifying effective risk-reduction measures. In: *Science of the Total Environment* 514, S. 418–425.
- Connor, R. F.; Hiroki, K. (2005): Development of a method for assessing flood vulnerability. In: *Water Science & Technology* 51 (5), S. 61–67.
- Cordes, U.; Conze, K.-J. (2013): Biotopkataster Rheinland-Pfalz. Allgemeine Angaben zur landesweiten Biotopkartierung ab 2006. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz.

-
- CORFU (2014): Collaborative Research on Flood Resilience in Urban areas (CORFU). funded by the European Union's Seventh Framework Programme for research, technological development and demonstration under grant agreement no: 244047. Projektseite. Online verfügbar unter <http://www.corfu7.eu/>, zuletzt geprüft am 21.01.2018.
- Costa-Cabral, M. C.; Burges, S. J. (1994): Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. In: *Water Resources Research* 30 (6), S. 1681–1692.
- Crichton, D. (1999): The Risk Triangle In: Ingleton, J. (Hg.): Natural disaster management. A presentation to commemorate the International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR). 1990-2000. Leicester: Tudor Rose, S. 102–103.
- Czickus, S. (2014): Stadtgebietsweite Risikoanalysen auf Basis von Fließwegen und Senken In: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hg.). 13. Regenwassertage. Dresden, 01. - 02. Juli 2014. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).
- DESTATIS (2016): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. DESTATIS. Wiesbaden.
- Die Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Langfassung. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf, zuletzt geprüft am 06.07.2015.
- Die Bundesregierung (2015): Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Stand 16. November 2015. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawan-del_das_fortschrittsbericht_bf.pdf, zuletzt geprüft am 10.10.2018.
- Dikau, R.; Pohl, J. (2007): "Hazards": Naturgefahren und Naturrisiken In: Gebhardt, H., Glaser, R. et al. (Hg.): Geographie. Physische Geographie und Humangeographie. 1. Aufl. München: Spektrum Akademischer Verlag, S. 1029–1076.
- DIN (2017): Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Kanalmanagement; Deutsche Fassung EN 752:2017.
- Djordjević, S.; Butler, D.; Gourbesville, P.; Mark, O.; Pasche, E. (2011): New policies to deal with climate change and other drivers impacting on resilience to flooding in urban areas: the CORFU approach. In: *Environmental Science & Policy* 14 (7), S. 864–873.
- Djordjević, S.; Ivetic, M.; Maksimović, Č.; Rajcevic, A. (1991): An approach to the simulation of street flooding in the modeling of surcharged flow in storm sewers In: Maksimović, Č. (Hg.). International Conference of Urban Draining and New Technologies UDT'91. Dubrovnik, Yugoslavia, 17-21 June 1991, S. 101–108.
- Djordjević, S.; Prodanović, D.; Maksimović, Č. (1999): An approach to simulation of dual drainage. In: *Water Science & Technology* 39 (9), S. 95–103.
- DKKV / Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e.V. (Hg.) (2003): Hochwasservorsorge in Deutschland. Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet. 'Lessons Learned'. DKKV, Dt. Komitee für Katastrophenvorsorge e.V., Schriftenreihe des DKKV, Band 29.

- Drachenfels, O. von (2016): Kartierschlüssel für Biotoptypen in Niedersachsen unter besonderer Berücksichtigung der gesetzlich geschützten Biotope sowie der Lebensraumtypen von Anhang I der FFH-Richtlinie. 10. korrigierte und geänderte Auflage 2018. Hg. v. Fachbehörde für Umweltschutz Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Naturschutz und Landschaftspflege in Niedersachsen, A/4). Online verfügbar unter <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/naturschutz/biotopschutz/biotopkartierung/kartierschlüssel/>, zuletzt geprüft am 09.11.2018.
- DRCOG / Denver Regional Council of Governments (Hg.) (1969): Urban storm drainage criteria manual. Unter Mitarbeit von Wright-McLaughlin Engineers. Denver, Colorado (USA).
- DST / Deutscher Städtetag (Hg.) (2015): Starkregen und Sturzfluten in Städten. Eine Arbeitshilfe. Berlin, Köln.
- DWA (2006a): Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Arbeitsblatt DWA-A 118. März 2006. Hennef (Sieg), Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA-Regelwerk.
- DWA (2006b): Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung (ISiE). Arbeitsblatt DWA-A 100. Dezember 2006. Hennef (Sieg), Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA-Regelwerk.
- DWA (2008): Prüfung der Überflutungssicherheit von Entwässerungssystemen. Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe ES-2.5 „Anforderungen und Grundsätze der Entwässerungssicherheit“. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 55 (9), S. 972–976.
- DWA (2012): Schadensanalysen und Projektbewertung im Hochwasserrisikomanagement. Hennef, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA-Themen, Band T 1/2012.
- DWA (2013a): Methoden der Überflutungsberechnung. Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe ES-2.6 „Abfluss- und Schmutzfrachtsimulation“. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 60 (6), S. 506–511.
- DWA (2013b): Starkregen und urbane Sturzfluten. Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge. Hennef, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA-Themen, Band T1/2013.
- DWA (2016): Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge - Analyse von Überflutungsgefährdungen und Schadenspotenzialen zur Bewertung von Überflutungsrisiken. November 2016. Hennef, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, DWA-Regelwerk, Band Merkblatt DWA-M 119.
- DWD (2016): KOSTRA-DWD 2010. KOordinierte STarkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen, Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Hannover.
- DWD (2018): RADOLAN/RADVOR-OP. Hoch aufgelöste Niederschlagsanalyse und -vorhersage auf der Basis quantitativer Radar- und Ombrometerdaten für grenzüberschreitende Fluss-Einzugsgebiete von Deutschland im Echtzeitbetrieb. Beschreibung

-
- des Kompositformats. Hg. v. Deutscher Wetterdienst (DWD). Abteilung Hydrometeorologie (Version 2.4.3).
- Egli, T. (1996): Hochwasserschutz und Raumplanung. Schutz vor Naturgefahren mit Instrumenten der Raumplanung - dargestellt am Beispiel von Hochwasser und Murgängen. Zürich, Verlag der Fachvereine, ORL-Bericht, Band Nr. 100.
- Ehrmantraut, E.; Nerkamp, K.-H. (2011): Konzeption und Nutzung des automatisiert geführten Liegenschaftskatasters In: Kummer, K. und Frankenberger, J. (Hg.): Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen 2012. Themenschwerpunkte 2012: - Jahresrückblick - ALKIS: Das Amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem. Berlin: Wichmann, S. 137–164.
- Erskine, R. H.; Green, T. R.; Ramirez, J. A.; MacDonald, L. H. (2006): Comparison of grid-based algorithms for computing upslope contributing area. In: *Water Resources Research* 42 (9), S. 43.
- ESRI / Environmental Systems Research Institute Inc. (Hg.) (2011): Arc Hydro Tools Version 2.0. Tutorial.
- Fairfield, J.; Leymarie, P. (1991): Drainage networks from grid digital elevation models. In: *Water Resources Research* 27 (5), S. 709–717.
- FLOODSite (Hg.) (2009): Flood risk assessment and flood risk management. An introduction and guidance based on experiences and findings of FLOODsite (an EU-funded Integrated project). Unter Mitarbeit von de Bruijn, K., Klijn, F., Ölfert, A. und Penning-Rowell, E., T29-09-01.
- Fratini, C. F.; Geldof, G. D.; Kluck, J.; Mikkelsen, P. S. (2012): Three Points Approach (3PA) for urban flood risk management: A tool to support climate change adaptation through transdisciplinarity and multifunctionality. In: *Urban Water Journal* 9 (5), S. 317–331.
- Freeman, T. G. (1991): Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. In: *Computers & Geosciences* 17 (3), S. 413–422.
- Freni, G.; La Loggia, G.; Notaro, V. (2010): Uncertainty in urban flood damage assessment due to urban drainage modelling and depth-damage curve estimation. In: *Water Science & Technology* 61 (12), S. 2979–2993.
- Fuchs, L. (2013): Methoden und Beispiele zur Gefährdungsanalyse und Risikoabschätzung von urbanen Sturzfluten In: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hg.). 12. Regenwassertage. Freiburg-Munzingen, 10. - 11. Juni 2013, S. 1–13.
- Fuchs, L.; Lindenberg, M.; Egger, U. (2012): Investigation of flooding for a large urban catchment In: 9th International Conference on Urban Drainage Modelling (9UDM). Belgrade. International Water Association (IWA).
- Fuchs, L.; Lindenberg, M.; Männig, F.; Schmitt, T. G. (2009): Überflutungsprüfungen im Rahmen der generellen Entwässerungsplanung in der Stadt Dresden. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 56 (4), S. 358–364.

- Fuchs, L.; Schmidt, N. (2015): Vergleich von 2-dimensionalen Berechnungsansätzen für die Gefährdungsanalyse in urbanen Gebieten. In: *Österr Wasser- und Abfallw* 67 (5-6), S. 187–196.
- Gallant, J. C.; Wilson, J. P. (2000): Primary topographic attributes In: Wilson, J. P. und Gallant, J. C. (Hg.): *Terrain analysis. Principles and applications*. New York: Wiley, S. 51–85.
- Garatwa, W.; Bollin, C. (2002): *Disaster Risk Management - Working Concept*. Hg. v. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH (GTZ). Eschborn. Online verfügbar unter <http://www.alnap.org/resource/7644>, zuletzt geprüft am 20.07.2017.
- GDI-DE (2010): *Architektur der Geodateninfrastruktur Deutschland (GDI-DE). Version 2.0. Konzept zur fach- und ebenenübergreifenden Bereitstellung und Nutzung von Geodaten im Rahmen des E-Government in Deutschland*. Unter Mitarbeit von Arbeitskreis Architektur der GDI-DE und Koordinierungsstelle GDI-DE (KSt. GDI-DE).
- GDV (2016): *Naturgefahrenreport 2016. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer in Zahlen, Stimmen und Ereignissen*. GDV.
- Geipel, R. (1992): *Naturrisiken. Katastrophenbewältigung im sozialen Umfeld*. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Geldof, G. D.; Kluck, J. (2008): The three points approach In: 11th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage (11ICUD). Edinburgh, Scotland, UK, 31 August - 5 September 2008. International Water Association (IWA), S. 1–10.
- geomer (Hg.) (2018): *Starkregengefahren im Einzugsgebiet der Glems*. geomer GmbH Heidelberg. Online verfügbar unter <http://www.starkregengefahr.de/glems/>, zuletzt geprüft am 21.01.2018.
- Glade, T. (2003): Vulnerability Assessment in Landslide Risk Analysis. Vulnerabilitätsbewertung in der Naturrisikoanalyse gravitativer Massenbewegungen. In: *Die Erde* 134 (2), S. 123–146.
- Gleich, A. von; Gößling-Reisemann, S.; Stührmann, S.; Wachsmuth, J. (2013): *Leitkonzept Resilienz. Projektkonsortium nordwest2050; MRNW*. Bremen, Oldenburg (nordwest2050 kurz+bündig, 7).
- Gleich, A. von; Gößling-Reisemann, S.; Stührmann, S.; Woizeschke, P.; Lutz-Kunisch, B. (2010): Resilienz als Leitkonzept – Vulnerabilität als analytische Kategorie In: Fichter, K., Gleich, A. von et al. (Hg.): *Theoretische Grundlagen für erfolgreiche Klimaanpassungsstrategien. Projektkonsortium nordwest2050; Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten e.V. (MRNW)*. Bremen, Oldenburg (nordwest2050 Berichte, Heft 1), S. 13–49.
- Gocht, M.; Merz, B. (2002): *Towards Establishing a Standard in Flood Mapping*. Hg. v. GFZ Potsdam.
- Hake, G.; Grünreich, D.; Meng, L. (2002): *Kartographie. Visualisierung raum-zeitlicher Informationen*. 8., vollständig neu bearbeitete und erw. Aufl. Berlin, De Gruyter.

-
- Hartmann, T.; Scheibel, M. (2016): Flood Label for buildings – a tool for more flood-resilient cities In: FLOODrisk (Hg.). 3rd European Conference on Flood Risk Management. Lyon, France, 17th - 21st October 2016, E3S Web of Conferences, Band 7.
- Harzer, C. (Hg.) (2017): GIS-Report 2017/18. Software Daten Firmen. Unter Mitarbeit von Krebs, B. 20. Aufl., Bernhard Harzer Verlag GmbH.
- Hatzfeld, F.; Kurz, S. (2010): Klimaangepasstes Bauen - Kriteriensteckbrief „Widerstandsfähigkeit gegen Naturgefahren: Wind, Starkregen, Hagel, Schnee/feuchte Winter und Hochwasser“. Endbericht. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (BBSR). Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH.
- Hauger, M. B.; Mouchel, J. M.; Mikkelsen, P. S. (2006): Indicators of hazard, vulnerability and risk in urban drainage. In: *Water Science & Technology* 54 (6-7), S. 441.
- Heuzeroth, T. (2015): Deutschland hinkt bei Street-View-Diensten hinterher. In: *WeltN24* 2015. Online verfügbar unter <https://www.welt.de/139729123>, zuletzt geprüft am 22.05.2017.
- HiOS (2018): HiOS - Hinweiskarte Oberflächenabfluss und Sturzflut. Webseite. Hg. v. Markus Disse. Technische Universität München. Online verfügbar unter <http://www.hios-projekt.de>, zuletzt geprüft am 02.11.2018.
- HKC / HochwasserKompetenzCentrum (HKC) e.V. (Hg.) (o.J.): Internetseite Hochwasserp-pass. Online verfügbar unter <https://www.hochwasser-pass.com/>, zuletzt geprüft am 16.08.2017.
- Hollenstein, K. H. R. (1996): Analyse, Bewertung und Management von Naturrisiken. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.3929/ethz-a-001772849>, zuletzt geprüft am 17.08.2017.
- Holling, C. S. (1973): Resilience and Stability of Ecological Systems. In: *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 4 (1), S. 1–23.
- Hoppe, H. (2017): Urbanes Niederschlagswassermanagement im Spannungsfeld zwischen zentralen und dezentralen Maßnahmen In: Muschalla, D. und Gruber, G. (Hg.). *Aqua Urbanica* 2017. Graz, 03.-04. Juli 2017. Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Technische Universität Graz, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Band 75, A1-A20.
- Hoppe, H.; Benden, J.; Kirschner, N. (2014): GIS-Analysen und Modelle zur Integration der Überflutungsvorsorge in die Stadtplanung In: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hg.). *GIS und GDI in der Wasserwirtschaft*. Fulda, 04. - 05. Februar 2014. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).
- Hoppe, H.; Graf-van Riesenbeck, G.; Rost, F.; Kirschner, N.; Massing, C.; Arnold, B.; Sander, S. (2012): Von der Hochwasserrisikokarte zur urbanen Gefährdungsanalyse - Methodik und Projekterfahrungen In: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hg.). *GIS und GDI in der Wasserwirtschaft*. Kassel, 25. - 26. Januar 2012. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).

- Howard, A. D. (1990): Role of hypsometry and planform in basin hydrologic response. In: *Hydrol. Process.* 4 (4), S. 373–385.
- HSB / Hochschule Bremen (Hg.) (2017): Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen. Praxisleitfaden, erstellt im Rahmen des DBU-Forschungsprojekts "KLASII". Unter Mitarbeit von Horn, J. von, Bonnet, C., Jeskulke, M., Hoppe, H., Schäfer, K. und Koch, M. Lehrgebiet Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft in Metropolregionen, Hochschule Bremen. Bremen.
- Hufschmidt, G. (2011): A comparative analysis of several vulnerability concepts. In: *Nat Hazards* 58 (2), S. 621–643.
- Hürter, H. (2018): Erarbeitung gebietsspezifischer Anwendungsempfehlungen für bidirektional gekoppelte 1D-2D-Überflutungsberechnungen. Dissertation. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen, TU Kaiserslautern, Band 2.
- Hutchinson, M. F. (1989): A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. In: *Journal of Hydrology* 106 (3-4), S. 211–232.
- HWRM-RL (2007): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken in der Fassung vom 23.10.2007. Fundstelle: Amtsblatt der Europäischen Union L288/27 vom 06.11.2007.
- Illgen, M. (2013): Zukunftsgerechte Überflutungsvorsorge In: Schmitt, T. G. (Hg.). Fachtagung Siedlungswasserwirtschaft 20.40.60. Kaiserslautern, 05. Juli 2013. Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der TU Kaiserslautern, Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, Band 36, S. 9–31.
- Illgen, M. (2016): Das neue DWA-Merkblatt 119: "Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge" In: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hg.). 15. Regenwassertage. Darmstadt, 05. - 06. Juli 2016. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).
- Illgen, M.; Schäfer, E. (2010): Ermittlung der Überflutungsgefährdung bei Extremereignissen. Lösungsvorschläge und Erfahrungen am Beispiel der Stadt Stuttgart In: DWA-Landesverband Baden-Württemberg und Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau, Landesverband Baden-Württemberg e.V. (Hg.). Symposium Starkregen in urbanen Gebieten. Karlsruhe-Grötzingen, 05.10.2010. DWA-Landesverband Baden-Württemberg (DWA-BW); Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau, Landesverband Baden-Württemberg e.V. (BWK-BW), S. 1–16.
- INSPIRE-RL (2007): Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE) in der Fassung vom 14.03.2007. Fundstelle: Amtsblatt der Europäischen Union L108 vom 25.04.2007, S.1-14.
- IPCC / Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.) (2001): Climate Change 2001: Synthesis Report. A contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assess-

-
- ment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Watson, Robert T. and the Core Writing Team, Cambridge University Press.
- IPCC / Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.) (2007): Climate change 2007. Impacts, adaptation and vulnerability : contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J. und Hanson, C. E., Cambridge University Press.
- IPCC / Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.) (2012): Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A Special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Qin, D., Dokken, D. J., Ebi, K. L. et al., Cambridge University Press.
- IPCC / Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.) (2013): Klimawandel 2013: Physikalische Grundlagen. Hauptaussagen aus der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger.
- IRGC / International Risk Governance Council (Hg.) (2005): Risk Governance. Towards an Integrative Approach. white paper no. 1. Unter Mitarbeit von Renn, O. und Graham, P. Geneva, zuletzt geprüft am 18.05.2015.
- ISO (2009): Risk Management - Principles and Guidelines.
- IVU-RL (2008): Richtlinie 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2008 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung in der Fassung vom kodifizierte Fassung vom 15.01.2008. Fundstelle: Amtsblatt der Europäischen Union L24/8 vom 29.01.2008.
- Juan-García, P.; Butler, D.; Comas, J.; Darch, G.; Sweetapple, C.; Thornton, A.; Corominas, L. (2017): Resilience theory incorporated into urban wastewater systems management. State of the art. In: *Water Research* 115, S. 149–161.
- Kang, S. H. (2009): Tight coupling 2D integrated urban inundation model on GIS to a high-density area, South Korea. In: *Water Science & Technology* 60 (2), S. 283–292.
- Keil, M.; Bock, M.; Esch, T.; Metz, A.; Nieland, S.; Pfitzner, A. (2011): CORINE Land Cover. Aktualisierung 2006 für Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau (UBA-Texte, 13/2011).
- KlimaNet - Wassersensible Stadtentwicklung (2010): Maßnahmen für eine nachhaltige Anpassung der regionalen Siedlungswasserwirtschaft an Klimatrends und Extremwetter. Abschlussbericht des Verbundvorhabens. im Förderschwerpunkt klimazwei des BMBF, Förderkennzeichen 01 LS 05017 A-C. Hg. v. RWTH Aachen, Universität Bochum und Universität Duisburg Essen. Aachen.
- Kluck, J.; Claessen, E. G.; Blok, G. M.; Boogaard, F. C. (2010): Modelling and mapping of urban storm water flooding - Communication and prioritizing actions through mapping urban flood resilience In: Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (Hg.). 7e Conférence internationale NOVATECH 2010. Lyon, France, June 28-30, 2010. Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (GRAIE), S. 1–9.

- Koch, M.; Behnken, K.; Schneider, B.; Gatke, D.; Thielking, K.; Wurthmann, J. et al. (2015): KlimaAnpassungsStrategie Extreme Regenerenignisse (KLAS). Schlussbericht des Projekts "Umgang mit Starkregenereignissen in der Stadtgemeinde Bremen". gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Hg. v. Freie Hansestadt Bremen, Senator für Bau, Umwelt und Verkehr (SUBV) und Umweltbetrieb Bremen. Bremen.
- Kommunal Agentur NRW GmbH (Hg.) (2015): Praxis Leitfaden Hochwasser- und Überflutungsschutz. Ansätze für eine fachübergreifende Zusammenarbeit innerhalb der Kommunalverwaltung zum Hochwasserrisikomanagement. Unter Mitarbeit von Appler, N., Queitsch, P., Vöcklinghaus, S. und Brosig, T. Düsseldorf. Online verfügbar unter <https://www.kommunalagenturnrw.de/files/kua/user/downloads/Leitfaden/>, zuletzt geprüft am 06.06.2016.
- König, A.; Saegrov, S.; Schilling, W. (2002): Damage Assessment for Urban Flooding In: 9th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage (9ICUD). Portland, Oregon, USA, September 8-13, 2002. International Water Association (IWA), S. 1–11.
- Köstler, H.; Fietz, M. (2005): Biotoptypenliste Berlins. auf der Grundlage der Liste der Biotoptypen Brandenburgs von Dr. Frank Zimmermann (Landesumweltamt Brandenburg, Stand 2003). Hg. v. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin. Berlin.
- Krieger, K. (2018): Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge: Erfahrungen mit der Umsetzung von Gefährdungs- und Risikoanalysen für Entwässerungssysteme bei Starkregen nach DWA-M 119 In: Schmitt, T. G. (Hg.). *aqua urbana* trifft RegenwasserTage 2018. Landau in der Pfalz, 18./19. Juni 2018. Wasser Infrastruktur Ressourcen, Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen, TU Kaiserslautern, Band 1, S. 43–53.
- 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 (2), S. 145–149.
- Kromschröder, B. (2003): Risiko – Risikoforschung – Risikokommunikation In: Geiss, J., Wortmann, D. und Zuber, F. (Hg.): *Nachhaltige Entwicklung - Strategie für das 21. Jahrhundert? Eine interdisziplinäre Annäherung*. Opladen: Leske + Budrich, Buchforum für Zukunftsfragen, S. 123–142.
- Langbein, W. B. (1947): Topographic characteristics of drainage basin. In: *United States Geological Survey (Water Supply Paper 968-C)*, S. 125–157.
- LANUV / Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hg.) (2012): Klimawandel in Stadtentwässerung und Stadtentwicklung (KISS) - Methoden und Konzepte. Abschlussbericht. Projekt des Klima-Innovationsfonds IF-37. Unter Mitarbeit von Hoppe, H., Schmitt, T. G. und Einfalt, T. Erkrath, zuletzt geprüft am 22.02.2018.
- Lauwe, P.; Riegel, C. (2008): Schutz kritischer Infrastrukturen - Konzepte zur Versorgungssicherung. In: *Informationen zur Raumentwicklung* (1-2), S. 113–125.
- LAWA (2010a): PEN-LAWA 2010. Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags, Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Hannover.

-
- LAWA / Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (Hg.) (2010b): Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwasserrisikomanagementplänen. LAWA-AH. Dresden.
- LAWA / Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (Hg.) (2017): Empfehlungen für die Überprüfung der vorläufigen Bewertung des Hochwasserrisikos und der Risikogebiete nach EU-HWRM-RL. Vorläufige Risikobewertung (PFRA) ab dem 2. Zyklus der Umsetzung der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie in Deutschland. beschlossen auf der 153. LAWA-Vollversammlung 16./17. März 2017 Karlsruhe. LAWA-AH. Karlsruhe.
- LAWA / Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (Hg.) (2018): LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement. Unter Mitarbeit von Weiner, S., Pennekamp, S. und Heiland, P. Kleingruppe Starkregen (LAWA-AH). Erfurt.
- Lea, N. L. (1992): An aspect driven kinematic routing algorithm In: Parsons, A. J. und Abrahams, A. D. (Hg.): Overland flow: Hydraulics and erosion mechanics. Proceedings from a workshop held at the University of Keele, Jul. 8-11, 1991. London: University College London Press, S. 393–407.
- Leandro, J.; Santos, B.; Leitão, J. P.; Siekmann, T.; Urich, C. (2012): Towards mORE Resilient Cities (ToRC) In: 9th International Conference on Urban Drainage Modelling (9UDM). Belgrade. International Water Association (IWA).
- Lenz, S. (2009): Vulnerabilität kritischer Infrastrukturen. Bonn, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Forschung im Bevölkerungsschutz, Band 4.
- Li, J.; Heap, A. D. (2008): A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. Canberra, Geoscience Australia, Record / Geoscience Australia, Band 2008/23.
- Li, Z.; Zhu, Q.; Gold, C. (2005): Digital terrain modeling. Principles and methodology. New York, CRC Press.
- Lindsay, J. B.; Creed, I. F. (2006): Distinguishing actual and artefact depressions in digital elevation data. In: *Computers & Geosciences* 32 (8), S. 1192–1204.
- Lippeverband (2018): Starkregengefahrenkarte Emscher-Lippe-Region. Essen. Online verfügbar unter <https://starkgegenstarkregen.de/starkregenkarte/>, zuletzt geprüft am 21.01.2018.
- LUBW / Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hg.) (2016): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg.
- Luo, W. (1998): Hypsometric analysis with a geographic information system. In: *Computers & Geosciences* 24 (8), S. 815–821.
- Maksimović, Č.; Prodanović, D. (2001): Modelling of Urban Flooding - Breakthrough or Recycling of Outdated Concepts In: Brashear, R. W. und Maksimović, Č. (Hg.). World Water and Environmental Resources Congress. Orlando, Florida, 20.-24.05.2001, S. 1–9.
- Maksimović, Č.; Prodanović, D.; Boonya-aroonnet, S.; Leitão, J. P.; Djordjević, S.; Allitt, R. (2009): Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding. In: *Journal of hydraulic research* 47 (4), S. 512–523.

- Maniak, U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. 6., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg, Springer.
- Marg, O. (2016): Resilienz von Haushalten gegenüber extremen Ereignissen. Schadenserfahrung, Bewältigung und Anpassung bei Hochwasserbetroffenheit. 1. Aufl. Wiesbaden, Springer VS.
- Mark, D. M. (1984): Automatic Detection of Drainage Networks from Digital Elevation Models. In: *Cartographica* 21 (2-3), S. 168–178.
- Mark, O.; Weesakul, S.; Apirumanekul, C.; Boonya-aroonnet, S.; Djordjević, S. (2004): Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. In: *Journal of Hydrology* 299 (3-4), S. 284–299.
- Matzinger, A.; Zamzow, M.; Riechel, M.; Pawlowsky-Reusing, E.; Rouault, P. (2018): Quantitative Beschreibung der Resilienz urbaner Wassersysteme In: Schmitt, T. G. (Hg.). aqua urbanica trifft RegenwasserTage 2018. Landau in der Pfalz, 18./19. Juni 2018. Wasser Infrastruktur Ressourcen, Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen, TU Kaiserslautern, Band 1, S. 119–127.
- Merz, B.; Kreibich, H.; Schwarze, R.; Thieken, A. H. (2010): Assessment of economic flood damage. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10 (8), S. 1697–1724.
- Messner, F. (2006): Evaluation of flood damage and flood risk. FLOODmaster Project TU Dresden (FLOODSite Documentation, Report Nr. T09-06-04). Online verfügbar unter <http://www.floodsite.net>, zuletzt aktualisiert am 05.04.2006.
- Messner, F.; Meyer, V. (2007): Flood damage, vulnerability and risk perception – challenges for flood damage research In: Schanze, J., Zeman, E. und Marsalek, J. (Hg.): Flood Risk Management. Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures. Dordrecht: Springer Netherlands, Nato Science Series: IV, Band v. 67, S. 149–167.
- Mohr, L. B. (1993): Impact analysis for program evaluation. 2. Aufl. Newbury Park u.a., Sage.
- Moore, I. D.; Burch, G. J. (1986): Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. In: *Soil Science Society of America Journal* 50 (5), S. 1294.
- Moore, I. D.; Grayson, R. B.; Ladson, A. R. (1991): Digital Terrain Modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. In: *Hydrol. Process.* (Vol. 5), S. 3–30.
- Mugume, S. N.; Gomez, D. E.; Fu, G.; Farmani, R.; Butler, D. (2015): A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. In: *Water Research* 81, S. 15–26.
- Müller, U. (2010): Hochwasserrisikomanagement. Theorie und Praxis. Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden, Praxis.
- NICE (o.J.): Schutz sensibler Infrastruktur. Online verfügbar unter <http://www.nice.com/ge/critical-infrastructure.html>, zuletzt geprüft am 08.08.2017.
- Nichler, T.; Illgen, M.; Schäfer, E. (2011): Risikobewertung von Starkniederschlägen am Beispiel der Stadt Stuttgart In: Pinnekamp, J. (Hg.). 44. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. Eurogress Aachen, 23.-25.03.2011. Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen, Gewässerschutz, Wasser, Abwasser, Band 223.

-
- Nichler, T.; Niemann, A.; Illgen, M. (2010): Risikobewertung von Starkregenereignissen. Vorgehensweisen und Lösungsansätze In: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hg.). 9. Regenwassertage. Bremen, 08. - 09. Juni 2010. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).
- Niekamp, O.; Piroth, K. (2013): Hochwasserschäden In: Patt, H. und Jüpner, R. (Hg.): Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 519–552.
- Niemann, A.; Illgen, M. (2011): Urbane Überflutungsvorsorge. Was die Siedlungsentwässerung vom gewässerseitigen Hochwasserschutz lernen kann In: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hg.). 10. Regenwassertage. Bad Soden, 10. - 11. Mai 2011. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), S. 1–19.
- O'Callaghan, J. F.; Mark, D. M. (1984): The extraction of drainage networks from digital elevation data. In: *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 28 (3), S. 323–344.
- Parker, D. J.; Green, C. H.; Thompson, P. M. (1987): Urban flood protection benefits. A project appraisal guide. Aldershot, Hants, England, Brookfield, Vt., U.S.A., Gower Technical Press.
- Pomerol, J.-C.; Barba-Romero, S. (2000): Multicriterion Decision in Management. Principles and Practice. Boston, MA, Springer, International Series in Operations Research & Management Science, Band 25.
- Purdy, G. (2010): ISO 31000:2009 - Setting a new standard for risk management. In: *Risk analysis* 30 (6), S. 881–886.
- Queste, A.; Scheuermann, A.; Riegel, C. (2007): Kritische Infrastrukturen und Biologische Lagen In: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe und Robert Koch-Institut (Hg.): Biologische Gefahren I. Handbuch zum Bevölkerungsschutz. Unter Mitarbeit von Julia Sasse, Walter Biederbick, Stefan Brockmann, Monika Hermann, Bernhard Preuss, Jürgen Schreiber und Christine Uhlenhaut. 3. Aufl. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, S. 249–271.
- Quinn, P. F.; Beven, K. J.; Chevallier, P.; Planchon, O. (1991): The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. In: *Hydrol. Process.* 5 (1), S. 59–79.
- Reu, J. de; Bourgeois, J.; Bats, M.; Zwertvaegher, A.; Gelorini, V.; Smedt, P. de et al. (2013): Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. In: *Geomorphology* 186, S. 39–49.
- Ripley, B. D. (2004): Spatial statistics. New York [u.a.], Wiley, Wiley series in probability and statistics.
- RISA (2014): Handlungsziel Überflutungsvorsorge: Analyse des starkregenbedingten Überflutungsrisikos - Grundlagen und Methodik. Pilotgebiet „Schleemer Bach“. Abschlussbericht der AG Siedlungswasserwirtschaft des Projektes RISA - RegenInfrastrukturAnpassung. Begleitdokument zum Ergebnisbericht Regenwasser 2030. Unter Mitarbeit von Scheid, C., Schmitt, T. G., Bischoff, G., Hüffmeyer, N., Krieger, K. und

- Waldhoff, A. Hg. v. Hamburger Stadtentwässerung AöR (HSE) und Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie (BUE). Hamburg.
- RISA (2015): RISA Strukturplan Regenwasser 2030. Zukunftsfähiger Umgang mit Regenwasser in Hamburg. Ergebnisbericht des Projektes RISA – RegenInfraStrukturAnpassung. Hg. v. Hamburger Stadtentwässerung AöR (HSE) und Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie (BUE). Hamburg.
- Risikokommission (2003): Abschlussbericht der Risikokommission. ad hoc-Kommission "Neuordnung der Verfahren und Strukturen zur Risikobewertung und Standardsetzung im gesundheitlichen Umweltschutz der Bundesrepublik Deutschland". Salzgitter, zuletzt geprüft am 22.07.2015.
- Russo, B.; Suner, D.; Velasco, M.; Djordjević, S. (2012): Flood hazard assessment in the Raval District of Barcelona using a 1D/2D coupled model In: 9th International Conference on Urban Drainage Modelling (9UDM). Belgrade. International Water Association (IWA).
- Sander, S.; Hoppe, H.; Schlobinski, S. (2011): Integrating Climate Change in the Urban Planning Process – A Case Study In: Hřebíček, J., Schimak, G. und Denzer, R. (Hg.): Environmental Software Systems. Frameworks of eEnvironment. ISESS 2011, Bd. 359. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, IFIP Advances in Information and Communication Technology, Band 359, S. 631–640.
- Sartor, J. (1998): Die gleichzeitige Auftrittswahrscheinlichkeit hoher Abflüsse in Kanalisationsnetzen und Fließgewässern. The coincident probability of high discharges in sewer systems and running waters. In: *Wasser & Boden* 50 (8), S. 24–28.
- Schanze, J.; Schwarze, R.; Horlacher, H.-B.; Deilmann, C. (2015): Veränderung und Management der Risiken extremer Hochwasserereignisse in grossen Flussgebieten - am Beispiel der Elbe, Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Band Band 12.
- Schauer, J. (2010): Neue Grundlage der amtlichen Flächennutzungsstatistik. ALKIS - Chancen und Probleme. 2. Dresdner Flächennutzungssymposium. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV). Dresden 2010.
- Scheid, C.; Schmitt, T. G. (2016): Detailanalysen und Empfehlungen zur Anwendung des Starkregenindex für die Bewertung von Starkregenereignissen In: Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (Hg.). Aqua Urbana 2016. Rigi-Kaltbad, Schweiz, 26.-27.09.2016. Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (eawag), S. 170–174.
- Scheid, C.; Schmitt, T. G.; Bischoff, G.; Hüffmeyer, N.; Krieger, K.; Waldhoff, A.; Günner, C. (2013): GIS-based methodology for pluvial flood risk analysis in Hamburg In: Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (Hg.). 8e Conférence Internationale NOVATECH 2013. Lyon, France, June 23-27, 2013. Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (GRAIE), S. 203.
- Scheid, C.; Schmitt, T. G.; Stöhr, S. (2014): Topografische Gefährdungsanalyse für Starkregenüberflutungen am Beispiel der Stadt Saarbrücken. - Methodische Abstu-

-
- fungen und Sensitivitätsanalysen In: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (Hg.). Aqua Urbanica 2014. Innsbruck, 23. und 24. Oktober 2014, S. 1–6.
- Schelfaut, K.; Pannemans, B.; van der Craats, Irene; Krywkow, J.; Mysiak, J.; Cools, J. (2011): Bringing flood resilience into practice: the FREEMAN project. In: *Environmental Science & Policy* 14 (7), S. 825–833.
- Schmidt, T. (1997): Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland. Bonn, Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser, Mitteilungen des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. / (DVWK), Band 29.
- Schmitt, T. G. (2011): Risikomanagement statt Sicherheitsversprechen. Paradigmenwechsel auch im kommunalen Überflutungsschutz? In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 58 (1), S. 40–49.
- Schmitt, T. G. (2017): Ortsbezogene Regenhöhen im Starkregenindexkonzept SRI12 zur Risikokommunikation in der kommunalen Überflutungsvorsorge. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 64 (4), S. 294–300.
- Schmitt, T. G.; Krüger, M.; Pfister, A.; Becker, M.; Mudersbach, C.; Fuchs, L. et al. (2018): Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 65 (2), S. 113–120.
- Schmitt, T. G.; Scheid, C. (2014): UVoSaar - Entwicklung einer Methodik zur Überflutungsvorsorge und Klimaanpassung im Saarland. Schlussbericht (unveröffentlicht). im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz des Saarlandes und des ZKE - Zentraler kommunaler Entsorgungsbetrieb Saarbrücken. Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der TU Kaiserslautern. Kaiserslautern.
- Schmitt, T. G.; Schilling, W.; Saegrov, S.; Nieschulz, K.-P. (2002): Flood Risk Management for Urban Drainage Systems by Simulation and Optimisation In: 9th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage (9ICUD). Portland, Oregon, USA, September 8-13, 2002. International Water Association (IWA), S. 1–14.
- Schmitt, T. G.; Thomas, M.; Etrich, N. (2004): Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. In: *Journal of Hydrology* 299 (3-4), S. 300–311.
- Schmitt, T. G.; Worreschk, S. (2011): KRisMa - Kommunales Risikomanagement „Überflutungsschutz“. Schlussbericht. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz und des Wasserwirtschaftsverbandes Baden-Württemberg. Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der TU Kaiserslautern. Kaiserslautern.
- Sebald, C. (2010): Towards an Integrated Flood Vulnerability Index – A Flood Risk Assessment. M.Sc. Thesis. University of Twente, Twente. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation.
- Seibert, J.; McGlynn, B. L. (2007): A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. In: *Water Resources Research* 43 (4), S. 43.
- Seifert, M. (2005): Das AFIS-ALKIS-ATKIS-Anwendungsschema als Komponente einer Geodateninfrastruktur. In: *zfv* 130 (2), S. 77–81.

- Shepard, D. (1968): A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data In: ACM National Conference, S. 517–524.
- Sibson, R. (1981): A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation In: Barnett, V. (Hg.): Interpreting multivariate data. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, S. 21–36.
- SiSSI (2016): Simulation von Starkniederschlägen im Stadtgebiet Siegen (SiSSI). Kooperationsvorhaben zwischen dem Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen und dem Entsorgungsbetrieb der Stadt Siegen (ESi) zum Hochwasserschutz in Siegen. Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen. Webseite. Online verfügbar unter <https://www.bau.uni-siegen.de/fwu/wb/starkregen-siegen/index.html?lang=de>, zuletzt aktualisiert am 20.06.2018, zuletzt geprüft am 02.11.2018.
- Smith, K. (2013): Environmental hazards. Assessing risk and reducing disaster. 6. Auflage. Abingdon, Oxon, New York, Routledge.
- Smith, K.; Ward, R. (1998): Floods: Physical processes and human impacts. New York, Wiley.
- Smith, M. B. (2006): Comment on ‘Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems’. In: *Journal of Hydrology* 317 (3-4), S. 355–363.
- SRU (1999): Umwelt und Gesundheit- Risiken richtig einschätzen. Sondergutachten des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen.
- Stalman, V.; Draschhoff, R.; Günther, T.; Pfister, A.; Prellberg, D.; Verworn, H.-R.; Malitz, G. (2004): Das Niederschlagsregelwerk für die Deutsche Wasserwirtschaft. In: *Wasserwirtschaft* (10), S. 8–27.
- StEB / Stadtentwässerungsbetriebe Köln (AöR) (Hg.) (2018): Starkregengefahrenkarte Köln. Online verfügbar unter <http://www.hw-karten.de/index.html>, zuletzt geprüft am 21.01.2018.
- Sto. Domingo, N. D.; Refsgaard, A.; Mark, O.; Paludan, B. (2010): Flood analysis in mixed-urban areas reflecting interactions with the complete water cycle through coupled hydrologic-hydraulic modelling. In: *Water Science & Technology* 62 (6), S. 1386–1392.
- Strahler, A. N. (1952): Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. In: *Geol Soc America Bull* 63 (11), S. 1117.
- Tarboton, D. G. (1997): A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. In: *Water Resources Research* 33 (2), S. 309–319.
- Tarboton, D. G. (2015): Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM). Version 5.3. Utah Water Research Laboratory, Utah State University. Online verfügbar unter <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/index.html>, zuletzt geprüft am 19.01.2018.
- Taubenböck, H. (2007): Vulnerabilitätsabschätzung der erdbebengefährdeten Megacity Istanbul mit Methoden der Fernerkundung. Dissertation. Bayerische Julius-Maximilians Universität Würzburg. Online verfügbar unter https://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/files/2401/Dissertation_Taubenboeck_2008.pdf, zuletzt geprüft am 22.05.2017.

-
- ten Veldhuis, J. A. E.; Clemens, F. H. L. R. (2010): Flood risk modelling based on tangible and intangible urban flood damage quantification. In: *Water Science & Technology* 62 (1), S. 189.
- ten Veldhuis, J. A. E.; Clemens, F. H. L. R.; van Gelder, P. H. A. J. M. (2009): Fault tree analysis for urban flooding. In: *Water Science & Technology* 59 (8), S. 1621–1629.
- Thieken, A. H. (2008): Neue Modelle zur Abschätzung von Hochwasserschäden. In: *Ökologisches Wirtschaften* (3), S. 30–34.
- Thieken, A. H.; Seifert, I.; Merz, B. (Hg.) (2010): Hochwasserschäden. Erfassung, Abschätzung und Vermeidung, Oekom.
- Thywissen, K. (2006): Components of risk. A comparative glossary. Bonn, UNU Institute for Environment and Human Security, Studies of the University: Research, Counsel, Education, Band 2.
- Tira, M. (1997): Pianificare la città sicura. Roma, Edizioni Librerie Dedalo.
- UNDR0 / Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator (Hg.) (1979): Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Report of Expert Group Meeting 9-12 July 1979. Geneva.
- UNISDR / United Nations International Strategy for Disaster Reduction (Hg.) (2004a): Living with risk. A global review of disaster reduction initiatives. Volume I. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, United Nations.
- UNISDR / United Nations International Strategy for Disaster Reduction (Hg.) (2004b): Living with risk. A global review of disaster reduction initiatives. Volume II - Annexes. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, United Nations.
- UNISDR / United Nations International Strategy for Disaster Reduction (Hg.) (2005): Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters. World Conference on Disaster Reduction. Kobe, Hyogo, Japan, 18-22 January 2005.
- Verworn, H.-R.; Draschoff, R. (2008): PEN-Erweiterung. Untersuchungen und Datenanalysen für ein Verfahren zur Ermittlung von extremen Starkniederschlagshöhen kurzer Dauerstufen auf der Grundlage von KOSTRA-DWD 2000 und PEN-LAWA 2005. Ein F+E - Vorhaben im Auftrag der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Leibniz Universität Hannover. Hannover, zuletzt geprüft am 21.02.2014.
- Verworn, H.-R.; Kummer, U. (2003): Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags (PEN). Abschlussbericht. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Leibniz Universität Hannover.
- Verworn, H.-R.; Kummer, U. (2006): Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags (PEN). Fortschreibung des Abschlussberichts vom Oktober 2003. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Leibniz Universität Hannover, zuletzt geprüft am 21.02.2014.
- Villordon, M. B. B. L.; Gourbesville, P. (2014): Vulnerability index for urban flooding: Understanding social vulnerabilities and risks In: 11th International Conference on Hy-

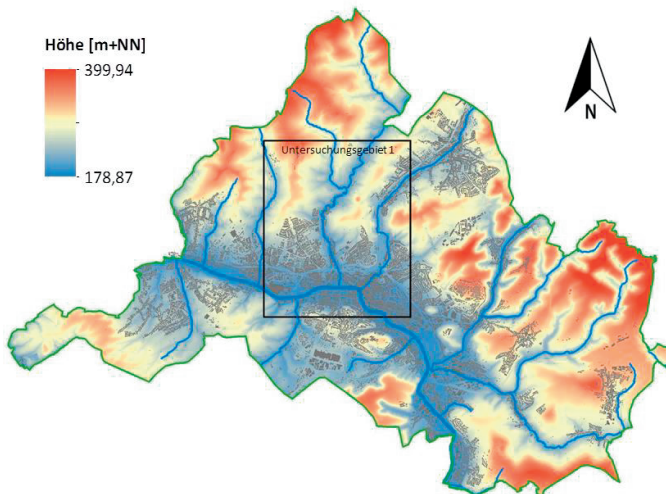
- droinformatics (HIC 2014). New York City, USA, 17 - 21 August 2014. International Water Association (IWA).
- Wang, L.; Liu, H. (2006): An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. In: *International Journal of Geographical Information Science* 20 (2), S. 193–213.
- WBGU (1999): Welt im Wandel: Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Jahrestgutachten 1998. Berlin Heidelberg, Springer.
- WHG (2010): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz) in der Fassung vom 31.07.2009 geändert durch Art. 2 des Gesetzes vom 08.04.2013 (BGBl. I S. 734). In: *BGBl. I* (51), S. 2585.
- White, P.; Pelling, M.; Sen, K.; Seddon, D.; Russell, S.; Few, R. (2005): Disaster risk reduction: a development concern. A scoping study on links between disaster risk reduction, poverty and development. DFID. London. Online verfügbar unter http://www.preventionweb.net/files/1070_drrscopingstudy.pdf, zuletzt geprüft am 22.05.2017.
- Wilson, J. P.; Gallant, J. C. (2000a): Digital Terrain Analysis In: Wilson, J. P. und Gallant, J. C. (Hg.): *Terrain analysis. Principles and applications*. New York: Wiley, S. 1–27.
- Wilson, J. P.; Gallant, J. C. (Hg.) (2000b): *Terrain analysis. Principles and applications*, Wiley.
- Wisner, B.; Blaikie, P.; Cannon, T.; Davis, I. (2003): *At Risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters*. 2nd Edition. London, Routledge.
- Zhang, S.; Pan, B. (2014): An urban storm-inundation simulation method based on GIS. In: *Journal of Hydrology* 517, S. 260–268.
- Zhou, Q.; Mikkelsen, P. S.; Halsnæs, K.; Arnbjerg-Nielsen, K. (2012a): Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits. In: *Journal of Hydrology* (414-415), S. 539–549.
- Zhou, Q.; Petersen, T. E. P.; Thorsen, B. J.; Arnbjerg-Nielsen, K. (2012b): Verification of flood damage modelling using insurance data In: 9th International Conference on Urban Drainage Modelling (9UDM). Belgrade. International Water Association (IWA).
- Zimmermann, F.; Düvel, M.; Herrmann, A. (2011): *Biotopkartierung Brandenburg. Liste der Biotoptypen mit Angaben zum gesetzlichen Schutz (§ 32 BbgNatSchG), zur Gefährdung und zur Regenerierbarkeit*. Hg. v. Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg.

Anhang

A-1 Beschreibung der Untersuchungsgebiete

Untersuchungsgebiet 1: Saarbrücken (SB)

Das Untersuchungsgebiet 1 umfasst einen ausgewählten Innenstadtbereich von Saarbrücken, der sich über eine Gesamtfläche von ca. 30 km² nördlich der Saar erstreckt. Verwaltungstechnisch beinhaltet er i. W. die Stadtteile Malstatt und Jägersfreude sowie westliche Teile von St. Johann und nördliche Bereiche von Alt-Saarbrücken. Es liegen mit den nördlich an das Stadtgebiet angrenzenden Ausläufern des Saarkohlenwalds und dem Verlauf der Saar im Süden sowohl topografisch bewegte als auch flachere Geländebereiche und Reliefformen im Untersuchungsgebiet vor. Die Siedlungs- und Bbauungsstruktur weist mit sowohl dichter Innenstadtbauung als auch kleinstädtischen Bereichen eine hohe Heterogenität und Diversität auf (Abbildung A-1). Das Gebiet wurde bereits im Rahmen des Forschungsvorhabens UVoSaar (Schmitt und Scheid 2014) bearbeitet. Es ist für die vorliegende Fragestellung der topografischen Gefährdungs- und Risikoanalyse bedeutsam, da für dieses Gebiet aus vergangenen Ereignissen mehrere Überflutungsschwerpunkte (u. a. Tallage des Fischbachs, Bereich Rußhütte, Ludwigsbergkreisel) bekannt sind und entsprechende Einsatzmeldungen der Feuerwehr verfügbar sind.



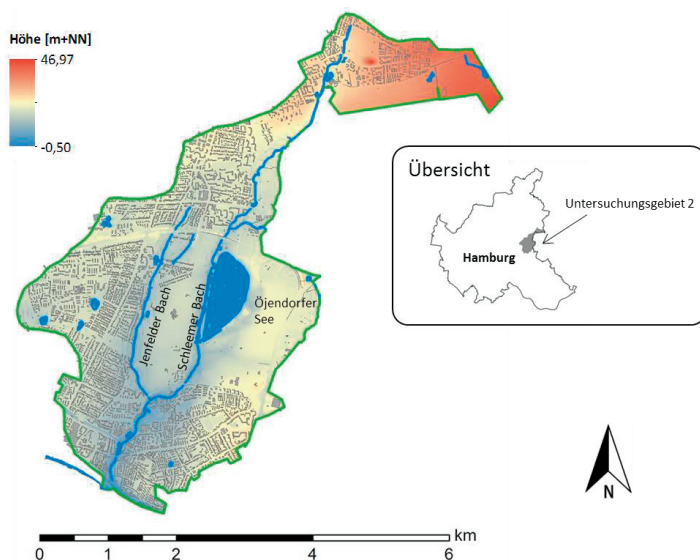
Geodatengrundlage: © LHS/LVGL (2016)

Abbildung A-1: Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken): Oberflächenmodell

Untersuchungsgebiet 2: Hamburg (HH)

Das Untersuchungsgebiet 2 (Abbildung A-2) erstreckt sich am östlichen Rand von Hamburg in den Stadtteilen Jenfeld, Billstedt und Horn. Es liegt nördlich der Elbe im Geestland und deckt mit einer Gesamtfläche von ca. 17,5 km² den Hamburgischen Teilbereich des hydrologischen Einzugsgebiets des Schleemer Bachs ab. Dieser mündet in Billstedt in die Bille, einem nördlichen Zufluss der Unterelbe.

Die Siedlungs- und Bebauungsstruktur des Untersuchungsgebiets ist überwiegend kleinstädtisch geprägt mit wechselnden Anteilen an Einzel-, Reihenhaus- und Blockbebauung mit ausgeprägten Vegetations- und Grünflächen. Die Gesamtstruktur des Gebietes weist eine heterogene Nutzungsverteilung auf. Während sich westlich des Jenfelder Bachs, einem Nebengewässer des Schleemer Bachs, die mit Wohn- und Mischnutzung bebaute Siedlungsfläche konzentriert ist, erstreckt sich im östlichen Bereich des Untersuchungsgebiets mit dem Friedhof Öjendorf und dem Öjendorfer See eine ausgedehnte Park- und Gewässerzone ohne nennenswerte Bebauungsanteile.



Geodatengrundlage: © FHH-LGV (2018)

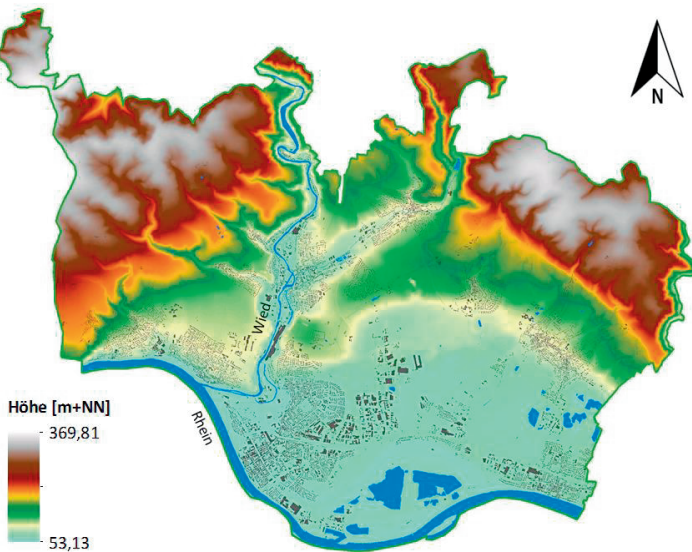
Abbildung A-2: Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg): Oberflächenmodell

Untersuchungsgebiet 3: Neuwied (NR)

Das Untersuchungsgebiet 3 (Abbildung A-3) erstreckt sich mit ca. 86 km² Ausdehnung nahezu über das gesamte Stadtgebiet Neuwied. Es wird südlich vom Rhein abgegrenzt und dehnt sich nach Norden bis zu den Höhen des Westerwaldes aus. Es umfasst neben dem Innenstadtbereich (Neuwied und Heddesdorf) und den an den Rhein angrenzenden Stadtteilen (Feldkirchen, Irlich und Engers) somit auch die nordwestlich und nordöstlich an den Westerwald angrenzenden Stadtteile und die dazwischen liegenden, überwiegend landwirtschaftlich genutzten Flächen des sogenannten Neuwieder Beckens.

Die Wied als namensgebender Fluß durchströmt das Untersuchungsgebiet aus Norden kommend und mündet in den Rhein. Das prägnanteste, wenn auch „künstliche“ topografische Merkmal des Untersuchungsgebiets besteht in der Eindeichung des südlichen Gebietsrandes, wo der Neuwieder Deich das Innenstadtgebiet vor Rheinhochwasser schützt. Für die topografische Gefährdungsanalyse ist die daraus resultierende Polderlage der Kernstadt von Bedeutung.

Die Siedlungs- und Bebauungsstruktur des Untersuchungsgebiets weist, ähnlich wie in Untersuchungsgebiet 1, eine hohe Heterogenität auf mit dichter Innenstadtbauung im Kernbereich und kleinstädtischen bis dörflichen Bereichen in den angrenzenden Stadtteilen.



Geodatengrundlage: © LUWG RP (2017)

Abbildung A-3: Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied): Oberflächenmodell

A-2 Anwendungsuntersuchungen zu topografischen Indices

In der Geomorphologie werden verschiedene topografische Indices verwendet, um Geländeeigenschaften, wie z. B. Neigungsverhältnisse oder die Erosions- und Sedimentationsneigung qualitativ oder quantitativ zu beschreiben. Zu den wichtigsten Indices gehören nach (Moore et al. 1991) die Indices

- Stream Power Index (SPI)
- Compound Topographic Index (CTI) oder Topographic Wetness Index und
- Topographic Position Index (TPI).

Diese werden nachfolgend kurz vorgestellt und beschrieben. Üblicherweise werden die Indices auf natürliche und im geomorphologischen Sinne „geglättete“ (senkenbereinigte) Einzugsgebiete angewendet, wobei die räumlichen Auflösungen mit mehreren Metern entsprechend niedriger sind als bei der topografischen Gefährdungsanalyse im urbanen Raum. Insofern ist zunächst die Übertragbarkeit und Anwendbarkeit der Indices auf Siedlungsräume mit vergleichsweise heterogener Topografie zu überprüfen. Dies erfolgt vorliegend anhand des Untersuchungsgebiets 1 (Saarbrücken). Es wird überprüft, ob und wie sich die drei genannten topografischen Indices als Geländeattribute in die GIS-gestützte Gefährdungsanalyse urbaner Räume implementieren und zur Gewinnung weiterer Gefährdungsinformationen verwenden lassen.

Mit dem **Stream Power Index** (SPI nach Wilson und Gallant 2000b bzw. Ω nach Moore und Burch 1986) wird in der Geomorphologie und digitalen Geländeanalyse die potenzielle Abtragskraft des Oberflächenabflusses und damit die Erosionsneigung des Geländes durch auftretenden Oberflächenabfluss abgeschätzt und quantifiziert. Dieser Aspekt ist grundsätzlich auch für Gefährdungslagen durch Sturzfluten in ländlichen Siedlungsbereichen mit hohem Außengebietseinfluss relevant.

Je nach Definition ergibt sich für ein Rasterfeld des DGM der Stream Power Index SPI_1 gemäß Gleichung (14) nach Moore und Burch (1986) bzw. zur Dämpfung von Extremwerten in logarithmischer Form als SPI_2 gemäß Gleichung (15):

$$SPI_1: \quad \Omega = A_S \cdot \tan \beta \quad (14)$$

$$SPI_2: \quad \ln(\Omega) = \ln(A_S \cdot \tan \beta) \quad (15)$$

mit: $A_S =$ spezifische Einzugsgebietsgröße in $[m^2 m^{-1}]$
 $\beta =$ Hangneigung $[^\circ]$

Werden die beiden primären Geländeattribute Einzugsgebietsgröße A_S und Gelände­neigung β als Quotient gemäß Gleichung (16) verarbeitet, so ergibt sich daraus der **Compound Topographic Index** (Beven und Kirkby 1979; Moore et al. 1991) oder

„topographic wetness index“ W (Wilson und Gallant 2000b). Dieser beschreibt, wie stark ein Geländebereich durch Oberflächenabflüsse hydromorphologisch geprägt ist und dient als topografische Kennzahl zur Lokalisierung von Vernässungsbereichen bzw. von nach Niederschlägen wassergesättigten Zonen. Hohe CTI-Werte werden in schwach geneigten Bereichen mit gleichzeitig großen Einzugsgebieten ausgewiesen, wo sich dementsprechend Oberflächenwasseransammlungen konzentrieren.

$$CTI: \quad w = \ln(A_S / \tan \beta) \quad (16)$$

mit: $A_S =$ spezifische Einzugsgebietsgröße in $[m^2m^{-1}]$
 $\beta =$ Hangneigung $[^\circ]$

Der **Topographic Position Index (TPI)** (Gallant und Wilson 2000; zitiert in Reu et al. 2013) verarbeitet im Gegensatz zu den beiden vorgenannten nur Höheninformationen. Darin wird der absolute oder relative Höhenunterschied eines Punktes zu den Höhen seiner Umgebung berechnet (Gleichungen (17) und (18)), wobei die Ausdehnung dieser Vergleichsumgebung festzulegen ist und variiert werden kann. Der TPI ist damit ein gut geeigneter Kennwert, um wechselnde Geländeverhältnisse, wie z. B. Böschungsabbrüche, Eintiefungen, aber auch rasche Übergänge von Berg- und Tallagen zu markieren.

$$TPI = z_0 - \bar{z} \quad (17)$$

$$\text{bzw.} \quad TPI_{rel} = (z_0 - \bar{z}) / \bar{z} \quad (18)$$

mit: $z_0 =$ Höhenwert des Bezugspunktes
 $\bar{z} =$ Mittelwert der Umgebungshöhen

Definitionsgemäß liefert der TPI negative und positive Werte. GIS-technisch können sowohl die Geometrie (Rechteck, Kreis, etc.) als auch die Entfernungen (Felderanzahl) festgelegt werden, was Einfluss auf den TPI hat.

Die Anwendung der topografischen Indices auf das Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken) wird anhand der Kartenausschnitte in Abbildung A-4 dokumentiert und kurz beschrieben. Die Ergebnisse zeigen, dass die unmittelbare Anwendung des **Stream Power Index SPI** auf urbane Siedlungsräume ähnlich problematisch ist wie bei der Krümmungsbetrachtung, da auch hier sehr weite Wertespanssen (hier zwischen 11 und 322.260) auftreten, die eine zielführende methodische Berücksichtigung erschweren. Aus der Bebauungsstruktur ergeben sich viele un stetige Oberflächenübergänge und Bruchkanten mit entsprechend sehr hohen, kleinräumigen Gefällen. Insbesondere vorhandene fiktive „Bruchkanten“ aus der Brückenelimination weisen hohe Neigungsgrade (fast 90°) auf und liefern demnach bei dem Ansatz SPI_1 maximale SPI-Werte, was durch die tan-Funktion bei $\beta \rightarrow 90^\circ$ verstärkt wird ($SPI \rightarrow \infty$). Sie

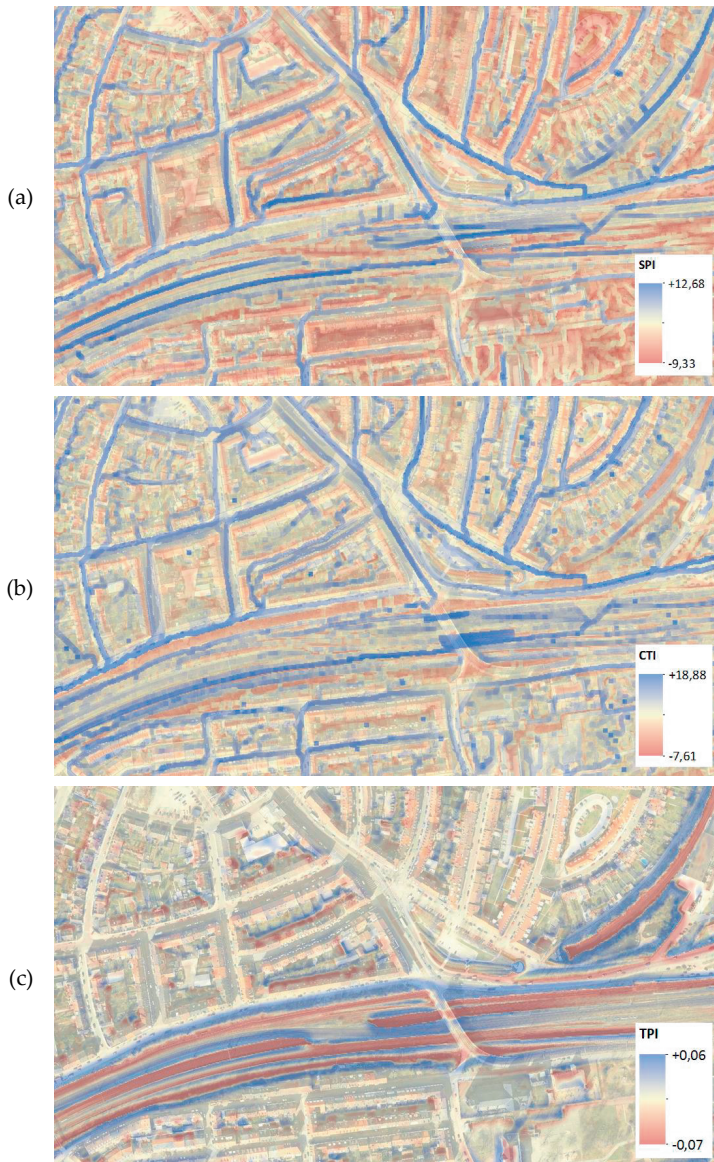
verzerren so die gewünschte Aussage des SPI. Der SPI sollte nach diesem Ansatz daher nur außerhalb des Siedlungsraumes, z.B. in den Außengebietslagen mit homogenerer Topografie oder einschränkend auf das DGM statt DOM angewendet werden.

Der zweite, logarithmische Ansatz SPI₂ liefert insgesamt homogenere Werte (zwischen -9,33 und +12,683) und ist somit besser geeignet (Abbildung A-4, oben). Dennoch gilt auch hierfür die Einschätzung, dass die Anwendung auf natürlich geprägte Außengebiete beschränkt werden sollte. Unabhängig davon ist auch für SPI eine räumliche Zusammenfassung der Rasterwerte zur Ergebnisglättung empfehlenswert.

Die Berechnung des **Compound Wetness Index CTI** liefert für das Untersuchungsgebiet eine ähnliche Größenordnung an Werten wie der logarithmische SPI-Ansatz (zwischen -9,94 und +18,885). Es sind aufgrund urbaner Einzelstrukturen die gleichen Unzulänglichkeiten erkennbar wie bei der SPI-Anwendung: Dort, wo aufgrund eliminiertes Brücken z. B. keine Gefälle vorliegen, werden die CTI-Werte maximal und sind daher nicht bewertungsrelevant. Im Übrigen zeichnen sich über den CTI die bekannten Fließwegstrukturen ab (Abbildung A-4, Mitte).

Insgesamt gelten für den CTI die gleichen Anwendungseinschränkungen wie beim SPI. Sie liefern zumindest bezogen auf den urbanen Siedlungsraum keinen Informationsmehrwert gegenüber der konventionellen Fließwegdarstellung. Insofern sollte die Anwendung und methodische Implementierung der beiden Indices SPI und CTI beschränkt und gezielt auf die hydrologische Bewertung von Außeneinzugsgebieten angewendet werden. Eine kategorische Implementierung in die Gefährdungsklassifizierung ist nicht zielführend.

Anders sind die Resultate der TPI-Anwendung (Abbildung A-4, unten) zu bewerten. Hier werden sehr gut die im urbanen Raum vorhandenen Höhenversprünge (Böschungen, Geländevertiefungen, etc.) hervorgehoben und markieren. Diese Bereiche können als ergänzende Informationen zur Gefährdungsbeurteilung für Starkregenüberflutungen herangezogen werden.



Geodatengrundlage: © LHS/LVGL (2016)

Abbildung A-4: Anwendung (a) des log. Stream Power Index (SPI), (b) des Compound Topographic Index (CTI) und (c) des relativen Topographic Position Index (TPI) auf urbane Strukturen, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

A-3 Untersuchungen zur Vorglättung

Auswertung der Vorglättung, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

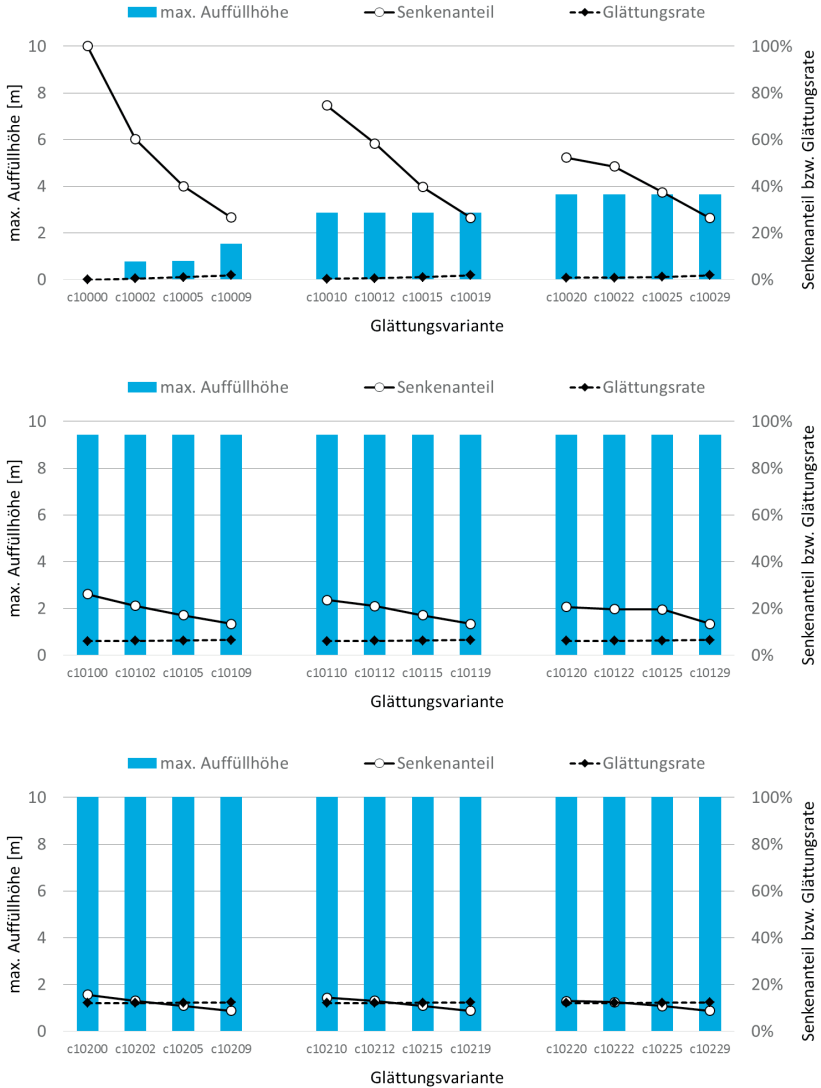


Abbildung A-5: Auswertung Vorglättungsvarianten c10000 – c10229, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

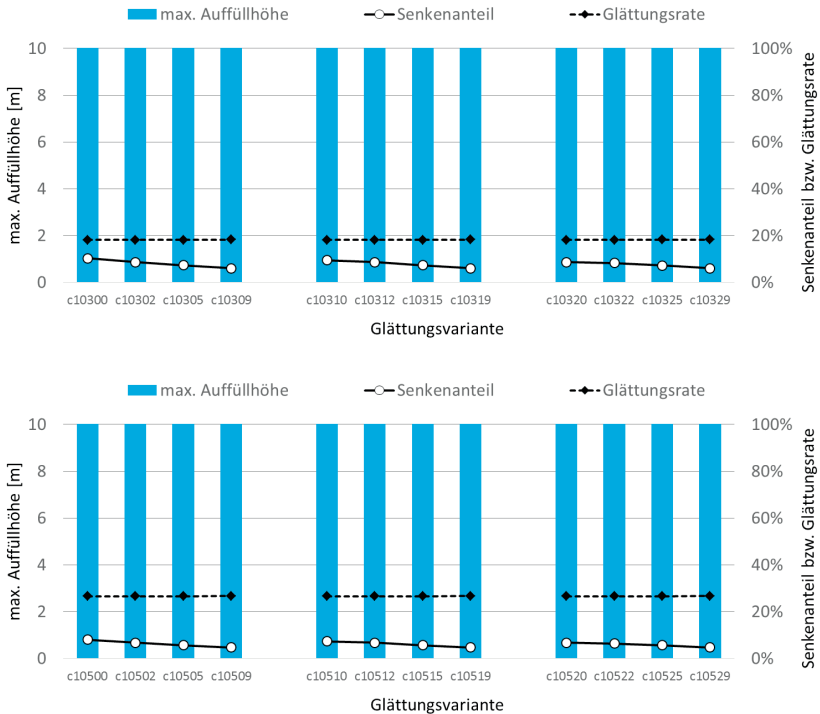


Abbildung A-6: Auswertung Vorglättungsvarianten c10300 – c10529, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

Erläuterung zu Abbildung A-5 und Abbildung A-6:

- Max. Auffüllhöhe [m]: bezeichnet die im Zuge der Vorglättung größte, eliminierte Einzelsenkentiefe, damit die maximale Höhendifferenz zwischen dem DOM vor und nach der Vorglättung
- Senkenanteil [%]: Verhältnis von verbleibender Senkenanzahl / ursprünglicher Senkenanzahl
- Glättungsrate [%]: Verhältnis von eliminiertem Senkenvolumen / ursprünglichem Senkenvolumen

Auswertung der Vorglättung, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)

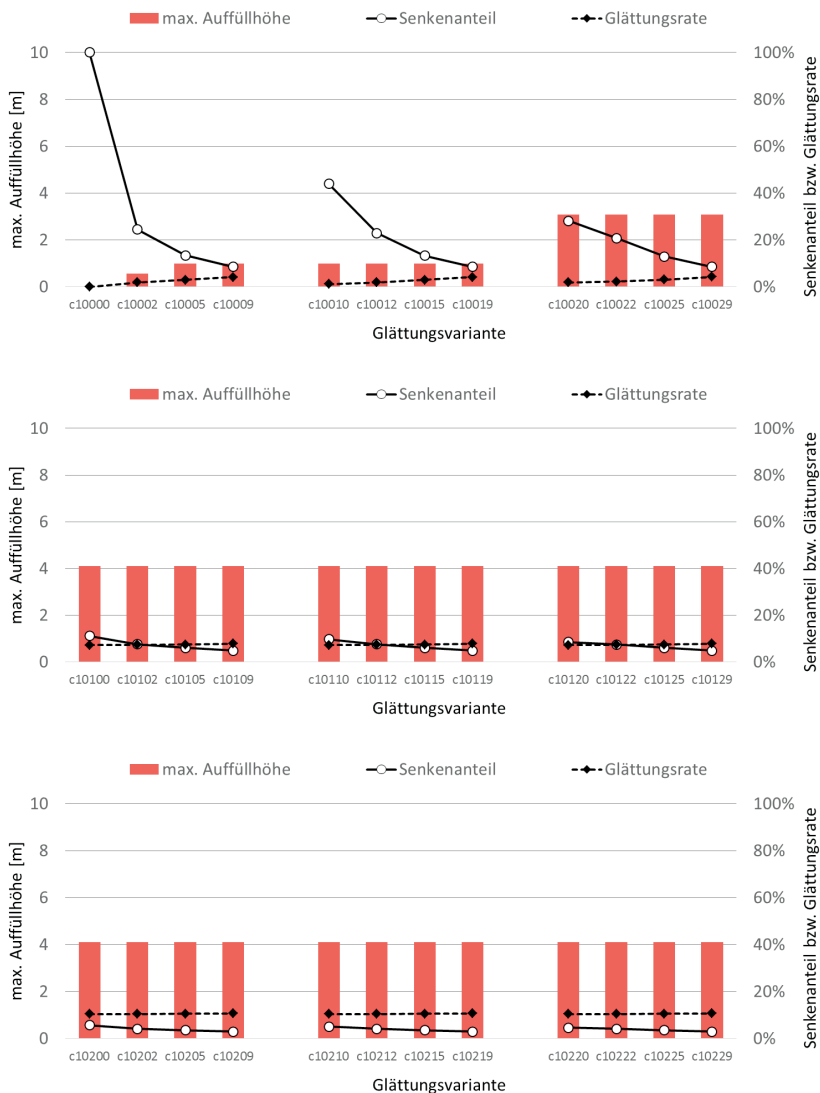


Abbildung A-7: Auswertung Vorglättungsvarianten c10000 – c10229, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)

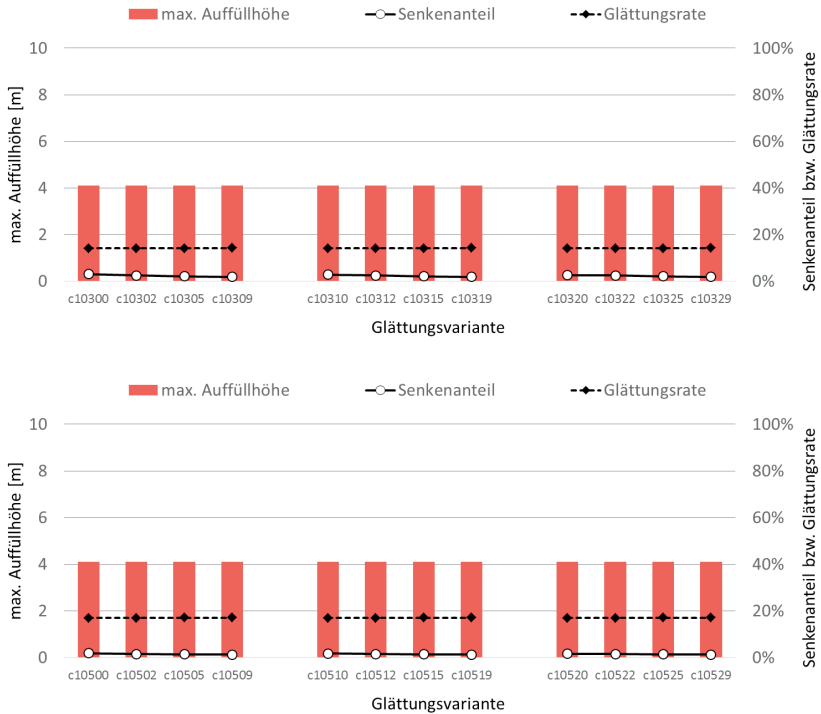


Abbildung A-8: Auswertung Vorglättungsvarianten c10300 – c10529, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)

Erläuterung zu Abbildung A-7 und Abbildung A-8:

- Max. Auffüllhöhe [m]: bezeichnet die im Zuge der Vorglättung größte, eliminierte Einzelsenkentiefe, damit die maximale Höhendifferenz zwischen dem DOM vor und nach der Vorglättung
- Senkenanteil [%]: Verhältnis von verbleibender Senkenanzahl / ursprünglicher Senkenanzahl
- Glättungsrate [%]: Verhältnis von eliminiertem Senkenvolumen / ursprünglichem Senkenvolumen

Statistische Auswertung der Senken nach Vorglättung

Tabelle A-1: Wertespektren der Senkenparameter, Untersuchungsgebiete 1 bis 3

Senkenparameter	Dim.	Untersuchungsgebiet 1 (SB)		Untersuchungsgebiet 2 (HH)		Untersuchungsgebiet 3 (NR)	
		min	max	min	max	min	max
maximale Senkentiefe $h_{S,max}$	cm	10	1.079	10	719	10	1.666
Höhenlage des Senkentieftiefpunkts $z_{S,min}$	m+NN	184,39	339,79	0,24	44,96	53,14	355,89
Höhenlage des maximalen Senkenfüllstands $z_{S,max}$	m+NN	185,96	341,27	1,59	45,38	56,64	356,01
Flächenausdehnung der Senke $A_{S,max}$	m ²	2	63.598	4	102.526	2	2.317.050
Senkenvolumen $V_{S,max}$	m ³	2	95.882	2	86.680	2	8.245.226
Einzugsgebietsfläche A_E	m ²	4	724.282	16	400.610	3	2.877.529
Undurchlässige Einzugsgebietsfläche A_U	m ²	3	232.921	0	234.973	2	2.048.147
Retentionshöhe h_{Ret}	mm	0,006	2.990	ca.0	13.282	ca. 0	1.008.765

Hinweis: Alle Angaben beziehen sich auf die bewertungsrelevanten Senken, d. h. ohne Gewässer und Innenhöfe

A-4 Variantenvergleich zur Gefahrenklassifizierung von Senken

Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

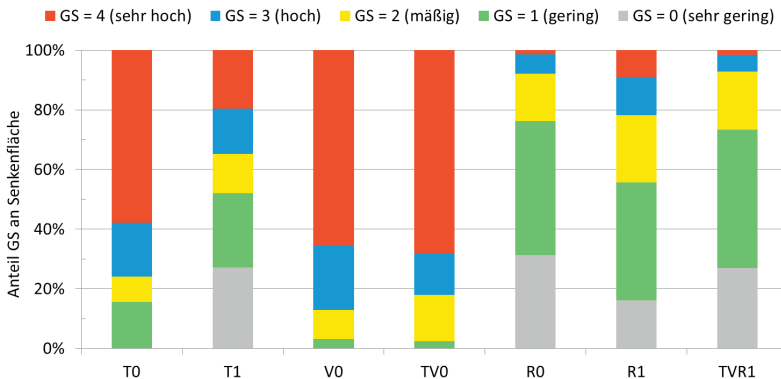


Abbildung A-9: Flächenanteile der Gefährungsklassen in den Senkenbereichen je Variante, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

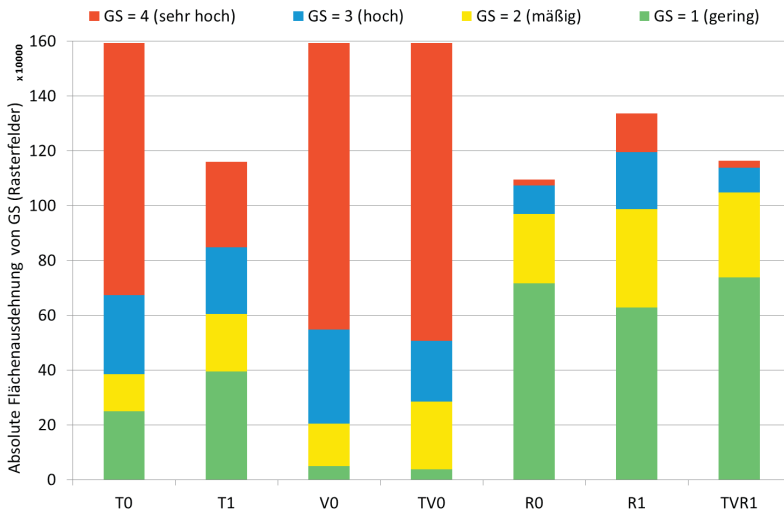


Abbildung A-10: Absolute Flächen der Gefährungsklassen in den Senkenbereichen je Variante, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

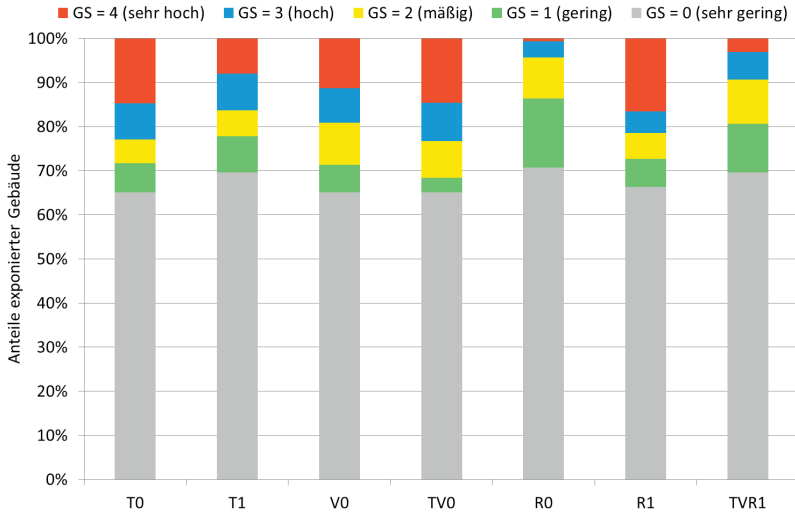


Abbildung A-11: Gefährdungsklassenanteile der exponierten Gebäude je Variante, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

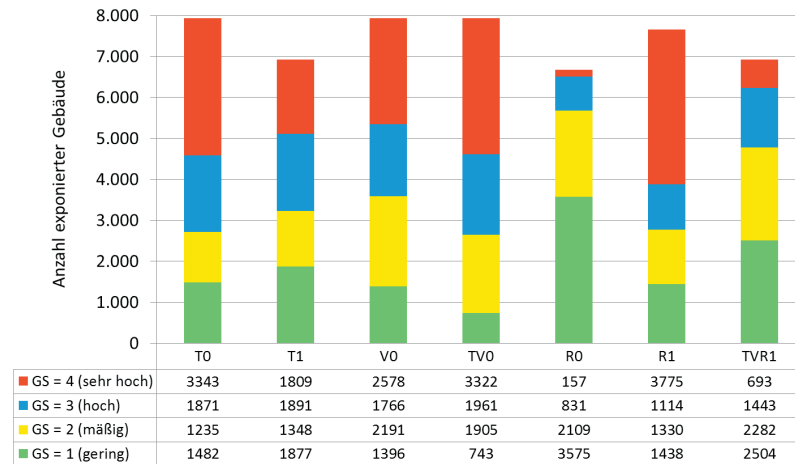


Abbildung A-12: Anzahl exponierter Gebäude je Gefährdungsklasse und Variante, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)

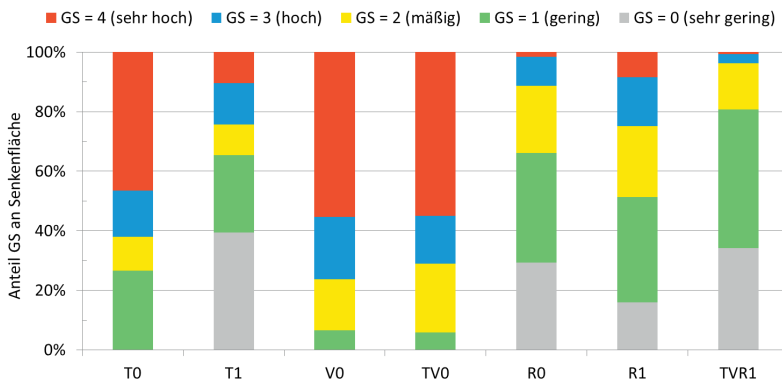


Abbildung A-13: Flächenanteile der Gefährdungsklassen in den Senkenbereichen je Variante, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)

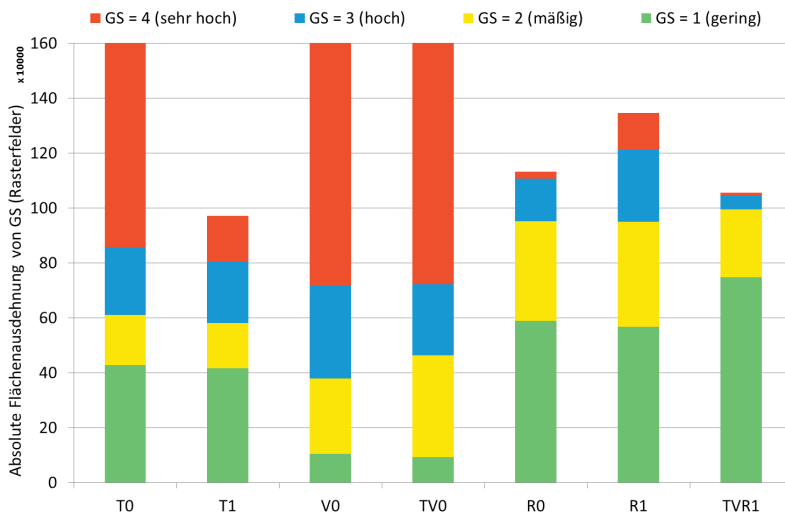


Abbildung A-14: Absolute Flächen der Gefährdungsklassen in den Senkenbereichen je Variante, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)

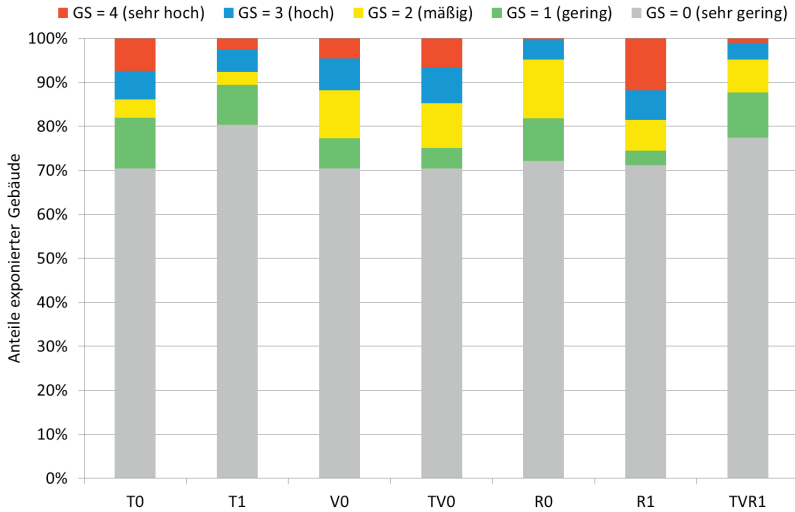


Abbildung A-15: Gefährdungsklassenanteile der exponierten Gebäude je Variante, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)

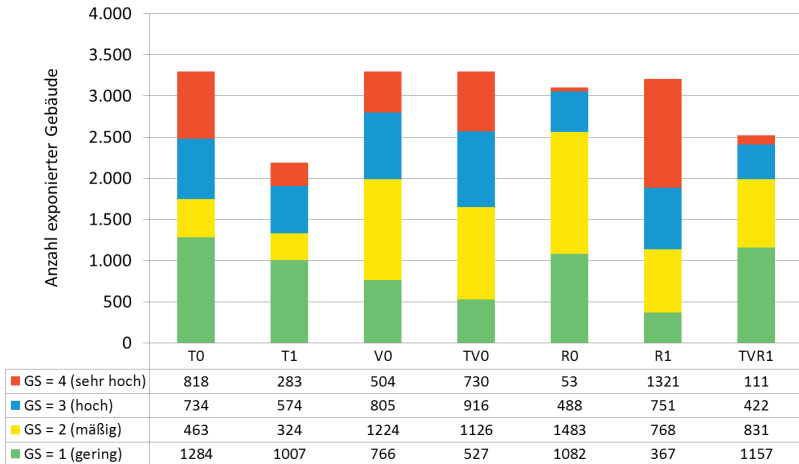


Abbildung A-16: Anzahl exponierter Gebäude je Gefährdungsklasse und Variante, Untersuchungsgebiet 2 (Hamburg)

A-5 Untersuchungen zum Effekt des Senkenüberlaufs

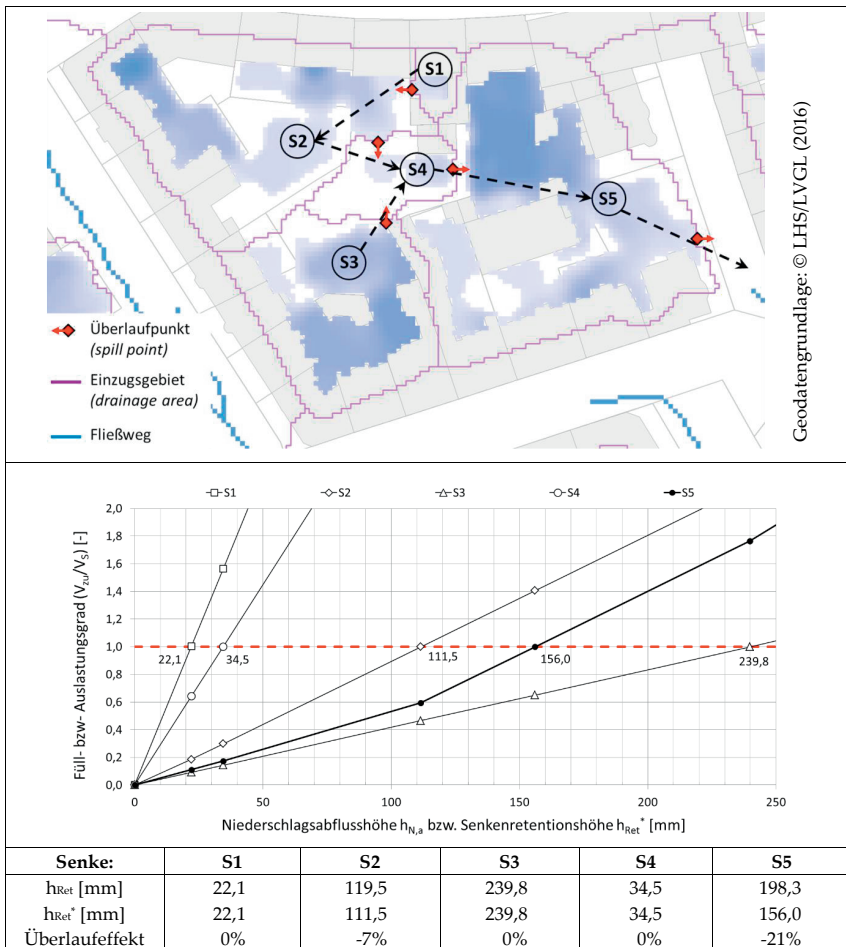


Abbildung A-17: Auswirkungen des Überlaufeffekts auf die Retentionshöhe h_{Ret} , Beispiel 1

Erläuterung

- Die Endsenke S5 steht maßgeblich unter Einfluss des Überlaufs aus den Senken S2 und S4. (Kritischer Teilstrang: S2-S4-S5)
- S4 läuft zwar eher über, ist bzgl. ihrer alleinigen Auswirkungen auf S5 zu vernachlässigen (kaum erkennbarer Knick von S5 bei 34,5mm), wie auch der Überlauf der sehr kleinen Senke S1 die Retentionshöhe von S2 nicht signifikant verändert.
- Das Beispiel zeigt insgesamt, dass der Überlaufeffekt ggf. nur punktuell relevant sein und auch hinsichtlich seiner Ausprägung stark variieren kann.

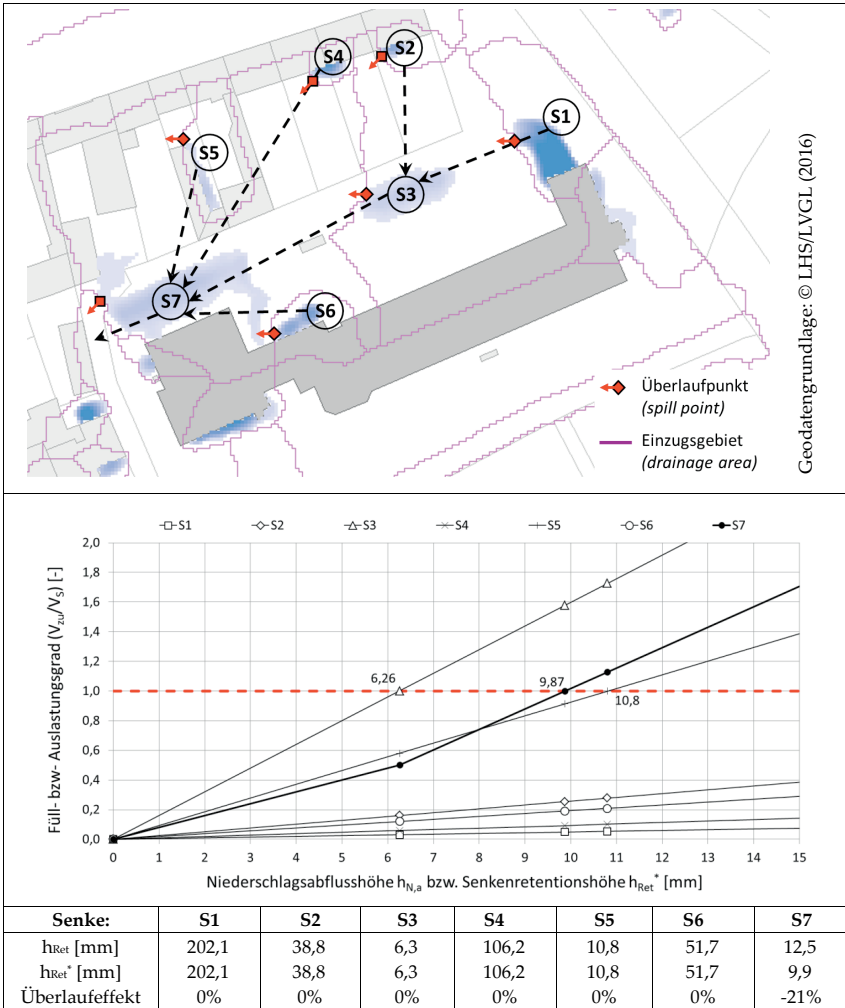


Abbildung A-18: Auswirkungen des Überlaufeffekts auf die Retentionshöhe h_{Ret} , Beispiel 2

Erläuterung

- Die Endsenke S7 steht unter alleinigem Einfluss des Überlaufs aus Senke S3.
- Alle anderen Senken weisen wesentlich höhere Retentionshöhen auf und laufen entsprechend „später“, d. h. bei stärkeren Niederschlagsabflüssen über. Sie sind daher nicht relevant für die Betrachtung.
- Das Beispiel zeigt insgesamt, dass der Überlaufeffekt ggf. nur punktuell relevant sein und auch hinsichtlich seiner Ausprägung stark variieren kann.

A-6 Schadenspotenzialanalyse für Gebäude

Schadenspotenzialanalyse nach Ansatz 2, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)

Die nach Bewertungsansatz 2 durchgeführte Schadenspotenzialklassifizierung der Objektwertarten (OWA) getrennt nach Vulnerabilitätsdimensionen SGN₂ dokumentiert Tabelle A-2. Darin sind auch die Vergleichswerte gemäß Ansatz 1 (SGN₁) enthalten.

Dokumentation der Schadenstypen nach Bewertungsansatz 3

Die für den Bewertungsansatz 3 definierten Schadenstypen mit Ausprägungszuordnung der Vulnerabilitätsdimensionen sind in Tabelle A-3 zusammengestellt.

Tabelle A-4 dokumentiert die Zuordnung der Relevanzen typischer Schadensbilder zu Objektwertarten (OWA) der Gebäude nach Bewertungsansatz 3.

Tabelle A-5 listet den Vergleich der resultierenden Schadenspotenzialklassifizierung nach den Bewertungsansätzen 1 bis 3 auf.

Tabelle A-2: Schadenspotenzialklassifizierung der OWA nach Vulnerabilitätsdimensionen SGN₂ (Ansatz 2) mit Vergleich zu SGN₁, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)

OWA	Gebäudefunktion	SGN _{PH}	SGN _{PM}	SGN _{SK}	SGN _W	SGN _U	SGN _{2,max}	SGN ₁
31001-GFK-1000	Wohngebäude	2	1	0	0	0	2	2
31001-GFK-2000	Geb. für Wirtschaft/Gewerbe	2	2	0	3	1	3	3
31001-GFK-2461	Parkhaus	0	3	0	0	0	3	3
31001-GFK-2462	Parkdeck	0	3	0	0	0	3	3
31001-GFK-2463	Garage	0	1	0	0	0	1	1
31001-GFK-2465	Tiefgarage	3	2	0	0	0	3	4
31001-GFK-2513	Wasserbehälter	5	1	5	5	0	5	5
31001-GFK-2523	Umformer	3	3	3	5	1	5	5
31001-GFK-3010	Verwaltungsgebäude	2	2	5	3	0	5	5
31001-GFK-3012	Rathaus	2	2	5	1	0	5	5
31001-GFK-3013	Post	1	3	4	3	0	4	3
31001-GFK-3015	Gericht	2	3	4	1	0	4	4
31001-GFK-3020	Geb. für Bildung / Forschung	3	3	4	2	1	4	3
31001-GFK-3021	Allgemein bildende Schule	3	2	4	1	0	4	4
31001-GFK-3022	Berufsbildende Schule	2	2	3	1	0	3	3
31001-GFK-3031	Schloss	1	3	4	0	0	4	3
31001-GFK-3032	Theater, Oper	3	3	4	0	0	4	3
31001-GFK-3034	Museum	2	4	4	1	0	4	4
31001-GFK-3036	Veranstaltungsgebäude	3	2	3	1	0	3	3
31001-GFK-3040	Gebäude für religiöse Zwecke	3	1	3	0	0	3	3
31001-GFK-3041	Kirche	3	1	3	0	0	3	3
31001-GFK-3043	Kapelle	2	1	2	0	0	2	2
31001-GFK-3045	Gotteshaus	3	1	3	0	0	3	3
31001-GFK-3050	Geb. für Gesundheitswesen	3	2	3	1	1	3	3
31001-GFK-3051	Krankenhaus	5	3	3	1	1	5	5
31001-GFK-3052	Heil-, Pflegeanstalt, P.station	4	3	3	1	1	4	4
31001-GFK-3060	Gebäude für soziale Zwecke	3	2	3	0	0	3	2
31001-GFK-3061	Jugendfreizeitheim	3	2	3	0	0	3	2
31001-GFK-3062	Freizeit-, Vereinsheim, etc.	3	2	3	0	0	3	2
31001-GFK-3063	Seniorenfreizeitstätte	4	2	3	0	0	4	3
31001-GFK-3065	Kindergarten, Kita	4	2	3	0	0	4	4
31001-GFK-3070	Geb. für Sicherheit / Ordnung	4	2	5	0	0	5	5
31001-GFK-3071	Polizei	4	2	5	0	0	5	5
31001-GFK-3072	Feuerwehr	4	3	5	0	0	5	5
31001-GFK-3080	Friedhofsgebäude	2	1	2	0	0	2	1
31001-GFK-3081	Trauerhalle	2	1	2	0	0	2	1
31001-GFK-3090	Empfangsgebäude	4	2	3	2	0	4	3
31001-GFK-3091	Bahnhofsgebäude	4	2	3	2	0	4	3
31001-GFK-3211	Sport-, Turnhalle	3	2	3	1	0	3	2
31001-GFK-3221	Hallenbad	3	3	3	1	0	3	3

(Klassifizierung SG: 0 – sehr gering; 1 - gering; 2 - mäßig; 3 – hoch 4 – sehr hoch 5 – KRITIS; Abweichungen SG₁ – SG₂ grau hinterlegt)

Tabelle A-3: Schadentypen mit Ausprägungsdimensionen, Bewertungsansatz 3

KURZ Schadentyp	Schadenbilder, Prozesse, Effekte	ASG- physisch/ human	ASG- physisch/ nicht-human	ASG- sozio-kulturell	ASG- ökonomisch	ASG- ökologisch	Anmerkungen
LIF Leben	Verlust von Menschentötungen	4		3	1		vielerlei Bevölkerungsgruppen
GSH Gesundheit	Verlust von Gesundheit	3		2	1		vielerlei Bevölkerungsgruppen
BWA Gebäudebauten (Allgemein)	Zerstörung von Gebäuden durch physische Einwirkungen (Wasserdruck, Treibkraft), Durchfeuchtung, chem. Angriff, Sedimentation		3	1	1		allerlei Bausubstanz, kein Bezug auf Gebäudenutzung und -funktion
BWK Gebäudebauten (Historisch)	Beschädigung/Zerstörung durch physische Einwirkungen (Wasserdruck, Treibkraft), Durchfeuchtung, chem. Angriff, Sedimentation		2	3	1		historische Bausubstanz, kein Bezug auf Gebäudenutzung und -funktion
BWG Gebäudebauten (Betriebl.)	Beschädigung/Zerstörung durch physische Einwirkungen (Wasserdruck, Treibkraft), Durchfeuchtung, chem. Angriff, Sedimentation		2	1	3	1	gewerblich-industrielle Bausubstanz, kein Bezug auf Gebäudenutzung und -funktion
IMP Immobilien (privat)	Beschädigung/Zerstörung durch physische Einwirkungen (Wasserdruck, Treibkraft), Durchfeuchtung, chem. Angriff, Sedimentation		3	1	3	1	Schäden an privaten Gebäuden durch physische Einwirkungen (z.B. HLK-Technik); dadurch durch Nutzungsausfall
IMK Immobilien (sozial)	Beschädigung/Zerstörung durch physische Einwirkungen (Wasserdruck, Treibkraft), Durchfeuchtung, chem. Angriff, Sedimentation		2	3	1		Mobil- oder bewegliche Güter der soziokulturellen Nutzung, die durch physische Einwirkungen durch Nutzungsausfall (z.B. Mobilität) betroffen sind
IK Immobilien (sozial-kulturell)	Beschädigung/Zerstörung durch physische Einwirkungen (Wasserdruck, Treibkraft), Durchfeuchtung, chem. Angriff, Sedimentation		2	3	1		Historische Kulturgüter, die durch physische Einwirkungen durch Nutzungsausfall (z.B. Mobilität) betroffen sind
IMG Immobilien (betriebl.)	Beschädigung/Zerstörung durch physische Einwirkungen (Wasserdruck, Treibkraft), Durchfeuchtung, chem. Angriff, Sedimentation		1	3	1		Produktions- (Betriebsmittel) / Lagergüter: sozio-kulturell und ökologisch je nach Ausmaß
IG Immobilien (betriebl.)	Beschädigung/Zerstörung durch physische Einwirkungen (Wasserdruck, Treibkraft), Durchfeuchtung, chem. Angriff, Sedimentation		1	3	1		Produktions- und Betriebsanlagen: sozio-kulturell und ökologisch je nach Ausmaß
REG RTS-Schäden Sektor Energie	Beschädigung/Zerstörung durch physische Einwirkungen (mechanisch, chemisch, bauphysikalisch); Prk., Notabkühlung	1	3	2	4		Stromerzeugung: Ök. und Mittelverfügbarkeit
KIT RTS-Schäden Sektor IT und Telekommunikation	Beschädigung/Zerstörung der Versorgungselemente durch physische Einwirkungen (mechanisch, chemisch, bauphysikalisch)	2	4	3	4		temp. Ausfall von Fernmeldesystemen (i.W. Mobilfunk)
KVK RTS-Schäden Sektor Transport & Verkehr	Beschädigung/Zerstörung der Transporteinheiten und -bauwerke durch physische Einwirkungen (mechanisch, chemisch, bauphysikalisch)	3	2	4	4		Schienen- und Straßennetze inkl. Bauwerke, Brücken, Unterzügen, Tunnel
KVL RTS-Schäden Sektor Transport & Verkehr - Logistik	Ausfall / Abschleichen von Gütern durch physische Einwirkungen (mechanisch, chemisch, bauphysikalisch)	3	2	4	4		Summe Verlust bei längerer Schadenauswirkung zum Fragen
KGM RTS-Schäden Sektor Gas und Wärme	Beschädigung/Zerstörung der Versorgungselemente/ Einrichtungen durch physische Einwirkungen (mechanisch, chemisch, bauphysikalisch); Ausfall/Restaurierung der med. Versorgung	4	3	2	2	1	med. Versorgung, Arznei- & Medikamente, Labore
KMW RTS-Schäden Sektor Wasser, Wasserversorgung	Beschädigung/Zerstörung der Versorgungselemente durch physische Einwirkungen (mechanisch, chemisch, bauphysikalisch)	4	3	2	3		Trinkwasserversorgung
KAW RTS-Schäden Sektor Wasser, Abwasser	Beschädigung/Zerstörung der Entsorgungselemente durch physische Einwirkungen (mechanisch, chemisch, bauphysikalisch)	4	3	1	2	3	Abwasserentsorgung
REL RTS-Schäden Sektor Ernährung	Beschädigung/Zerstörung der physischen Einwirkungen (mechanisch, chemisch, bauphysikalisch)	3	2	3	1		Lebensmittelherstellung, Ernährungswirtschaft
KFB RTS-Schäden Sektor Finanzen	Ausfall von Dienstleistungen durch Ausfall der Antriebsanlage und -mittel	2	4	3	4		Finanzen, Banken, Börse
KSV RTS-Schäden Sektor Staat und Verwaltung	Ausfall von Dienstleistungen durch Ausfall der Antriebsanlage und -mittel	2	4	3	1		Öffentliche Verwaltung, Dienstleistungen
KSS RTS-Schäden Sektor Staat und Verwaltung - Sicherheit	Ausfall von Dienstleistungen durch Ausfall der Antriebsanlage und -mittel	1	3	4	2	1	Polizei und Justiz
KSR RTS-Schäden Sektor Staat und Verwaltung - Notfall- Rettung	Ausfall von Dienstleistungen durch Ausfall der Antriebsanlage und -mittel	4	2	3	3	2	Feuerwehr, Rettungsdienste, Katastrophenschutz
KMM RTS-Schäden Sektor Medien und Kultur	Ausfall von Dienstleistungen durch Ausfall der Antriebsanlage und -mittel	1	3	2	2		Rundfunk, Presse
KMK RTS-Schäden Sektor Medien und Kultur - Kulturgüter	Ausfall von Dienstleistungen und Nutzung durch physische Einwirkungen (mechanisch, chemisch, bauphysikalisch)	2	2	3	2		Kultureinrichtungen, bedeutendes Kulturgut
LWS Schäden an Landwirtschaft/ökologischen	Anbau- und Ernteausfall (Lehrweise/ Vorkulturbau/ Erntekenn/ Stomochagbei Nutzereien)	1	3	1	3	1	sozio-kulturell je nach Ausmaß
FMS Schäden an Forstwirtschaft/ökologischen	Zerstörung von Bäumen und (Waldaufbau)				3	1	

(Legende zur Ausprägung: 0 – ohne; 1 – schwach; 2 – mittel; 3 – stark; 4 – sehr stark)

Tabelle A-4: Zuordnung der Relevanz (REL) typischer Schadensbilder zu Objektwertarten (OWA) Gebäude, Gebiet 3 (Neuwied)

OWA	Funktion	LIF	GSH	BWA	BWK	BWG	IMP	IP	IMK	IK	IMG	IG	KEG	KIT	KVK	KVL	KGM	KWV	KAW	KEL	KFB	KSV	KSS	KSR	KMM	KMK	LWS	FWS
31001-GFK-1000	1000 Wohngebäude	3	3	3	1	0	3	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-2000	2000 Gebäude für Wirtschaft oder Gewerbe	3	2	3	1	4	0	0	1	1	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-2461	2461 Parkhaus	2	2	1	0	2	3	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-2462	2462 Parkdeck	2	2	1	0	2	3	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-2463	2463 Garage	1	1	2	0	2	3	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-2465	2465 Tiefgarage	5	4	3	0	2	3	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-2513	2513 Wasserbehälter	2	3	0	0	2	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-2523	2523 Umformer	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	5	5	0	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2	2	0	0	0
31001-GFK-3010	3010 Verwaltunggebäude	4	2	3	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	3	1	0	0	0
31001-GFK-3012	3012 Rathaus	4	2	3	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3013	3013 Post	4	2	3	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	0
31001-GFK-3015	3015 Gericht	4	2	3	1	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0
31001-GFK-3020	3020 Gebäude für Bildung und Forschung	3	2	3	0	1	0	0	4	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3021	3021 Allgemeinbildende Schule	4	3	3	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3022	3022 Berufsbildende Schule	4	3	3	0	0	0	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3031	3031 Schloss	3	1	3	4	0	2	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
31001-GFK-3032	3032 Theater, Oper	4	2	3	2	0	0	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3034	3034 Museum	4	2	3	1	0	0	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
31001-GFK-3036	3036 Veranstaltungsbau	4	2	3	0	2	0	0	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
31001-GFK-3040	3040 Gebäude für religiöse Zwecke	4	2	3	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
31001-GFK-3041	3041 Kirche	4	2	2	3	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3043	3043 Kapelle	3	1	2	2	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3045	3045 Gotteshaus	4	2	2	3	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3050	3050 Gebäude für Gesundheitswesen	5	4	4	0	1	0	0	2	2	2	2	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
31001-GFK-3051	3051 Krankenhaus	5	4	4	0	1	0	0	2	2	2	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
31001-GFK-3052	3052 Heilanstalt, Pflegeanstalt, Pflegestation	4	3	4	0	1	0	0	2	2	2	2	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
31001-GFK-3060	3060 Gebäude für soziale Zwecke	4	3	3	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3061	3061 Jugendfreizeithelm	4	3	3	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3062	3062 Freizeit-, Vereinshelm, Dorfgemeinschafts-, Bürgerhaus	4	3	3	0	0	1	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3063	3063 Seniorenfreizeittische	5	4	3	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3065	3065 Kinderkrippe, Kindergarten, Kindertagesstätte	5	4	3	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3070	3070 Gebäude für Sicherheit und Ordnung	3	2	3	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	3	0	0	0
31001-GFK-3071	3071 Polizei	3	2	3	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3072	3072 Feuerwehr	3	2	3	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	0	0	0
31001-GFK-3080	3080 Friedhofgebäude	4	2	3	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3081	3081 Trauerhalle	4	2	3	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3090	3090 Empfangsgebäude	4	2	4	0	2	2	0	3	3	1	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3091	3091 Bahnhofsgebäude	4	2	4	0	2	2	0	3	3	1	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3211	3211 Sport-, Turnhalle	4	3	3	0	0	2	0	3	3	1	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31001-GFK-3221	3221 Hallenbad	4	4	4	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(Legende zur Relevanz: 0 – nicht relevant; 1 – sehr gering; 2 – gering; 3 – mittel; 4 – hoch; 5 – sehr hoch)

Tabelle A-5: Vergleich der resultierenden Schadenspotenzialklassifizierung nach den Ansätzen 1 bis 3, Untersuchungsgebiet 3 (Neuwied)

OWA	Gebäudedefunktion	SGN ₁	SGN _{2,max}	SGN _{3,max}
31001-GFK-1000	Wohngebäude	2	2	2
31001-GFK-2000	Gebäude für Wirtschaft und Gewerbe	3	3	2
31001-GFK-2461	Parkhaus	3	3	2
31001-GFK-2462	Parkdeck	3	3	2
31001-GFK-2463	Garage	1	1	2
31001-GFK-2465	Tiefgarage	4	3	4
31001-GFK-2513	Wasserbehälter	5	5	5
31001-GFK-2523	Umformer	5	5	5
31001-GFK-3010	Verwaltungsgebäude	5	5	5
31001-GFK-3012	Rathaus	5	5	5
31001-GFK-3013	Post	3	4	4
31001-GFK-3015	Gericht	4	4	3
31001-GFK-3020	Gebäude für Bildung und Forschung	3	4	2
31001-GFK-3021	Allgemein bildende Schule	4	4	3
31001-GFK-3022	Berufsbildende Schule	3	3	3
31001-GFK-3031	Schloss	3	4	2
31001-GFK-3032	Theater, Oper	3	4	3
31001-GFK-3034	Museum	4	4	3
31001-GFK-3036	Veranstaltungsgebäude	3	3	3
31001-GFK-3040	Gebäude für religiöse Zwecke	3	3	3
31001-GFK-3041	Kirche	3	3	3
31001-GFK-3043	Kapelle	2	2	2
31001-GFK-3045	Gotteshaus	3	3	3
31001-GFK-3050	Gebäude für Gesundheitswesen	3	3	4
31001-GFK-3051	Krankenhaus	5	5	5
31001-GFK-3052	Heil-, Pflegeanstalt, Pflegestation	4	4	4
31001-GFK-3060	Gebäude für soziale Zwecke	2	3	3
31001-GFK-3061	Jugendfreizeitheim	2	3	3
31001-GFK-3062	Freizeit-, Vereinsheim, Gemeindehaus	2	3	3
31001-GFK-3063	Seniorenfreizeitstätte	3	4	4
31001-GFK-3065	Kinderkrippe, Kindergarten, Kindertagesstätte	4	4	4
31001-GFK-3070	Gebäude für Sicherheit und Ordnung	5	5	5
31001-GFK-3071	Polizei	5	5	5
31001-GFK-3072	Feuerwehr	5	5	5
31001-GFK-3080	Friedhofsgebäude	1	2	3
31001-GFK-3081	Trauerhalle	1	2	3
31001-GFK-3090	Empfangsgebäude	3	4	3
31001-GFK-3091	Bahnhofsgebäude	3	4	3
31001-GFK-3211	Sport-, Turnhalle	2	3	3
31001-GFK-3221	Hallenbad	3	3	3

(Klassen SG: 0 – sehr gering; 1 - gering; 2 - mäßig; 3 – hoch 4 – sehr hoch 5 – KRITIS)

A-7 Schadenspotenzialklassifizierung neuralgischer Punkte

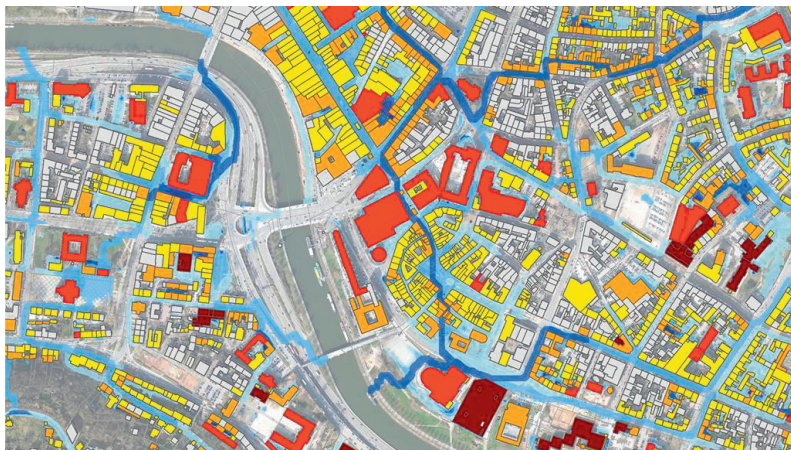
Tabelle A-6: Schadenspotenzialklassifizierung neuralgischer Punkte SK_P (verändert nach Schmitt und Scheid 2014)

Code	Typ	Medium	überquert / mündet in:	SK _P
111	Brücke	Straße	Straße	3
112	Brücke	Straße	Bahn	4
113	Brücke	Straße	Straße u. Bahn	4
114	Brücke	Straße	Weg	2
115	Brücke	Straße	Gewässer	1
117	Brücke	Straße	Straße u. Bahn u. Gewässer	4
121	Brücke	Bahn	Straße	3
122	Brücke	Bahn	Bahn	4
125	Brücke	Bahn	Gewässer	1
141	Brücke	Weg	Straße	1
142	Brücke	Weg	Bahn	1
143	Brücke	Weg	Straße u. Bahn	1
144	Brücke	Weg	Weg	1
145	Brücke	Weg	Gewässer	1
212	Kreuzungspunkt	Straße	Bahn	4
301	unterirdischer Zugang	Bahn, U-Bahn		5
302	unterirdischer Zugang	Keller, UG		5
303	unterirdischer Zugang	Bunker, Stollen		3
401	unterirdische Zufahrt	Tiefgarage		5
550	Gewässerdurchlass	Gewässer	Gelände	3
551	Gewässerdurchlass	Gewässer	Straße	5
552	Gewässerdurchlass	Gewässer	Bahn	5
553	Gewässerdurchlass	Gewässer	Straße u. Bahn	5
554	Gewässerdurchlass	Gewässer	Weg	4
559	Gewässerdurchlass	Gewässer	Gebäude	5
601	Einleitstelle	Kanal	Gewässer	1
608	Einlauf, Sandfang, Geröllfang	Gewässer/ Außengebiet	Kanal	5
711	Unterführung, Tunnel	Straße	Straße	4
712	Unterführung, Tunnel	Straße	Bahn	4
713	Unterführung, Tunnel	Straße	Straße u. Bahn	4
714	Unterführung, Tunnel	Straße	Weg	4
715	Unterführung, Tunnel	Straße	Gewässer	4
720	Unterführung, Tunnel	Bahn	Gelände	4
721	Unterführung, Tunnel	Bahn	Straße	4
722	Unterführung, Tunnel	Bahn	Bahn	4
724	Unterführung, Tunnel	Bahn	Weg	4
725	Unterführung, Tunnel	Bahn	Gewässer	4
731	Unterführung, Tunnel	Straße u. Bahn	Straße	4
741	Unterführung, Tunnel	Weg	Straße	3
742	Unterführung, Tunnel	Weg	Bahn	3
744	Unterführung, Tunnel	Weg	Weg	3
745	Unterführung, Tunnel	Weg	Gewässer	3

(Klassen SP: 1 – sehr gering; 2 – gering; 3 – mäßig; 4 – hoch 5 – sehr hoch)

A-8 Risikobewertung

Darstellungsvarianten von Risikokarten



Geodatengrundlage: © LHS/LVGL (2016)

Abbildung A-19: Beispiel einer Risikokarte gemäß sgn(G)-modifiziertem Additionsansatz, G und S gleichgewichtet (oben) und mit 2-fach gewichtetem Schadenspotenzial S (unten), Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken)

A-9 Risikoplausibilisierung

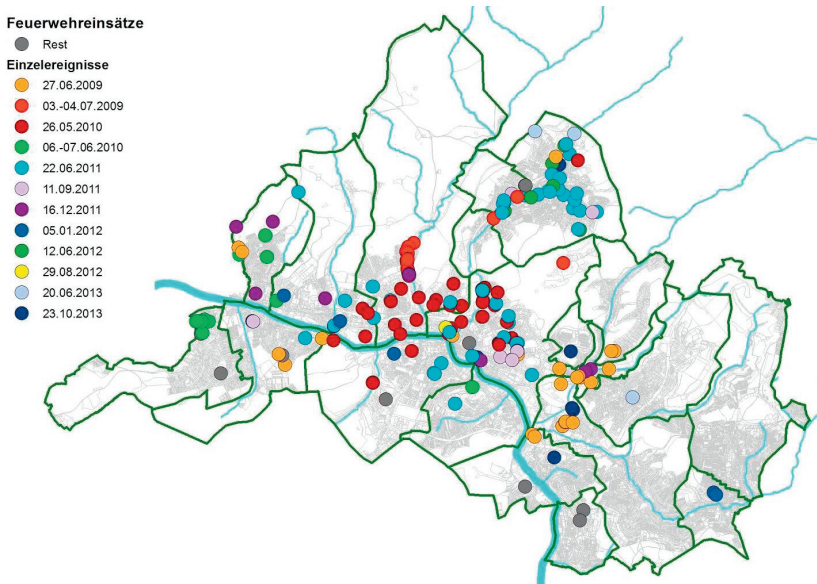
Plausibilisierung anhand ausgewerteter Feuerwehreinsätze

Zur **statistischen Lageauswertung** von registrierten Feuerwehreinsätzen wurden für das Untersuchungsgebiet 1¹² GIS-gestützte Abstandsberechnungen durchgeführt, bei denen die räumliche Nähe, idealerweise die räumliche Überlagerung, von Feuerwehreinsätzen auf der einen Seite und generierten Gefährdungszonen auf der anderen Seite analysiert werden. Dabei sind jedoch Lageungenauigkeiten in den Informationen zu den Feuerwehreinsätzen zu berücksichtigen, indem die Lageauswertungen über einen definierten Untersuchungsradius (z.B. 10 m oder 20 m) um die Punktdaten zu den Einsatzstellen vorgenommen werden. Es wird dann ausgezählt, wie sich die Flächenanteile der unterschiedlichen Gefährdungsklassen innerhalb der Auswerterradien statistisch verteilen, wobei grundsätzlich unterstellt wird, dass innerhalb der Auswertezone eines Feuerwehreinsatzes die Flächenanteile mit höherer Gefährdung signifikant häufiger sind als bei einer Vergleichsanalyse mit zufällig platzierten, gleichmäßig verteilten Auswertebereichen. Eine solche Vorgehensweise eignet sich vor allem zur flächendeckenden Plausibilisierung zahlreicher Einsatzdaten für großräumige Untersuchungsgebiete, birgt jedoch auch methodische Unsicherheiten. Beispielsweise erstrecken sich die Auswerterradien im Einzelfall auch über Senken- einzugsgebietsgrenzen, womit dann Wasserscheiden fälschlicherweise unberücksichtigt bleiben.

Im vorliegenden Fall ist für das ausgewählte Untersuchungsgebiet mit insgesamt 75 Einsatzmeldungen aus fünf Jahren (2009 – 2013) die Datenmenge noch ausreichend gering, um eine **Einzelüberprüfung der Einsatzmeldungen** durchzuführen und diese auf ihre Signifikanz und Plausibilität zu überprüfen. Dazu wurde für jede Einsatzmeldung die räumliche Nähe zu einer Gefährdungszone (Fließwege und/ oder Senkenbereich) analysiert und danach eine hohe, mittlere oder geringe Signifikanz attestiert. Die Ergebnisse dieser Vorgehensweise (Abbildung A-21) zeigen, dass ca. 80 % der registrierten Einsätze in einen eindeutigen kausalen Zusammenhang mit einer ausgewiesenen, erhöhten Gefährdungslage gesetzt werden können und demnach eine hohe Plausibilität für den betreffenden Gefährdungsbereich festgestellt werden kann.

Umgekehrt ist es nur in wenigen Ausnahmefällen (5 von 75 Einsätzen) nicht zufriedenstellend möglich, die Ursache des Einsatzes anhand der generierten Gefährdungslage nachzuvollziehen.

¹² Die hier vorgestellte Analyse wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „UVoSaar“ (Schmitt und Scheid 2014) durchgeführt.



Geodatengrundlage: © LHS/LVGL (2016) und Amt für Brand- und Zivilschutz Saarbrücken

Abbildung A-20: Beispiel einer Einsatzkarte für Feuerwehreinsätze des Zeitraums 2009-2013, Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken), (Schmitt und Scheid 2014)

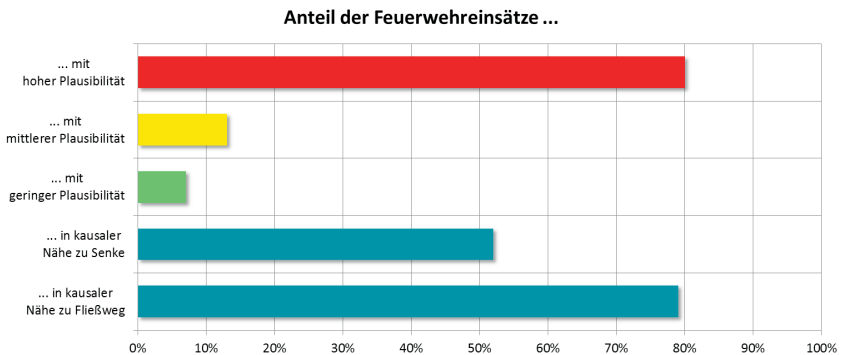


Abbildung A-21: Plausibilisierung ermittelter Gefährdungsbereiche anhand von Feuerwehreinsätzen (Zeitraum 2009 – 2013), Untersuchungsgebiet 1 (Saarbrücken), (Schmitt und Scheid 2014)

Lebenslauf

Dipl.-Ing. Christian Scheid

Beruflicher Werdegang

seit 07/2008	Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft & Abfallwirtschaft Wissenschaftlicher Mitarbeiter
03/2002 - 06/2008	ARCADIS Consult GmbH, Kaiserslautern Projektleiter und –bearbeiter, Bereiche Netzinformations- systeme, Siedlungsentwässerung und Hydrologie
07/2000 - 02/2002	Podufal + Wiehofskey Architekten und Ingenieure, Löhne Projektbearbeiter
03/2000 - 06/2000	Ingenieurbüro Holm + Partner GmbH, Schmalkalden Projektbearbeiter

Ausbildung und Studium

10/1992 - 09/1999	Studium Bauingenieurwesen, Universität Kaiserslautern - Abschluss: Diplom
1982-1991	Staatliches Leibniz-Gymnasium Pirmasens - Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

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
- Band 3 **Dissertation Baron, Silja (2018)**
Analyse von Transformationspfaden zur Ableitung von Handlungs-
empfehlungen für die Abwasserentsorgung im ländlichen Raum
ISBN 978-3-95974-096-8
- Band 4 **Dissertation Scheid, Christian (2018)**
GIS-basierte Starkregen-Risikoanalyse unter besonderer Berücksichtigung
von Datenerfordernissen und methodischer Aussagefähigkeit
ISBN 978-3-95974-102-6