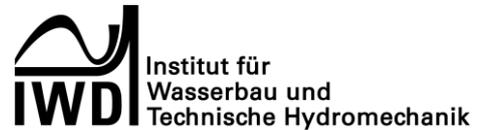


Analyse von Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung auf Gebäudeebene mittels zweidimensionaler, hydrodynamisch-numerischer Modelle

Diplomarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieurin (Dipl.-Ing.)

Eingereicht von:	Antonia Hippel
Geboren am:	12.04.1997 in Bünde
Matrikelnummer:	4678271
Verantwortlicher Hochschullehrer:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm
Wissenschaftliche Ansprechpartner:innen:	Dr.-Ing. Torsten Heyer Lars Backhaus M.Sc. Helene Meyer M.Sc.
Termin der Abgabe:	Dresden, 21.11.2023

Aufgabenstellung für die Diplomarbeit



Name: Antonia Hippel
Matrikel-Nr.: 4678271
Studiengang: Bauingenieurwesen
Vertiefung: Wasserbau und Umwelt

Thema: Analyse von Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -Speicherung auf Gebäudeebene mittels zweidimensionaler, hydrodynamisch-numerischer Modelle

Analysis of measures to increase water infiltration and storage at the building level using two-dimensional, hydrodynamic-numerical models

Motivation und Zielstellung

Die zunehmende Häufigkeit und Schwere extremer Wetterereignisse stellen eine erhebliche Bedrohung für die Bevölkerung dar. Die verheerenden Überschwemmungen in West- und Mitteleuropa im Juli 2021 haben gezeigt, dass es dringend notwendig ist, wirksame Methoden zur Schadensvorhersage und zur Ableitung privater Vorsorgemaßnahmen zur Unterstützung öffentlicher Maßnahmen zu entwickeln. Das Verständnis der Gefährdungsursachen, der Schadensprozesse und -potenziale sowie der Einsatz moderner Simulationsmodelle können dem Einzelnen und der Gemeinschaft helfen, sich auf extreme Hochwasser besser vorzubereiten und deren Auswirkungen abzumildern. Daher besteht die dringende Notwendigkeit, eine Bewertungsmethodik für private Vorsorgemaßnahmen zu entwickeln, um die Resilienz zu erhöhen und die negativen Konsequenzen von Hochwassern zu mindern.

Das Hauptziel der Arbeit ist die Entwicklung, Anwendung und Evaluation einer Bewertungsmethodik für private Hochwasser-Vorsorgemaßnahmen, die sich speziell auf die Versickerung und Speicherung von Wasser auf Gebäude- bzw. Grundstücksebene konzentriert. Anhand grün-grauer Maßnahmen und zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Simulationen sollen potentielle Vorsorgemaßnahmen evaluiert werden. Das Ergebnis dieser Arbeit ist die themenbezogene Erweiterung des Hochwasserpasses des HochwasserKompetenzCentrums (HKC), der bereits als effektives Instrument für das Management und die Kommunikation von Gefahren und Minderungsmaßnahmen von Extremhochwasser eingesetzt wird. Der Hochwasserpas soll im finalen Zustand eine quantitative Bewertung zur Beurteilung der Anfälligkeit von Gebäuden gegenüber verschiedenen Hochwasserszenarien, einschließlich Pluvial- und Grundwasserüberflutungen sowie

Kanalisationsrückstau ermöglichen und gleichzeitig fundierte Empfehlungen über weitere private Vorsorgemaßnahmen liefern.

1. Bearbeitungsumfang

Die Diplomarbeit soll mindestens folgende Arbeitsschwerpunkte beinhalten:

- Grundlagenrecherche zum Einfluss ober- bzw. unterirdischer hydrodynamischer Prozesse sowie zu Schadenspotentialen und -prozessen auf (privater) Gebäude und Grundstücksebene
- Zusammenstellung möglicher und geeigneter grauer und grüner privater Vorsorgemaßnahmen auf Gebäude- und Grundstücksebene zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung
- Entwicklung einer an den HKC-Hochwasserpas angelehnten quantitativen Bewertungsmethodik für die Gefährdung und Resilienz von Gebäuden gegenüber pluvialen Hochwassern und Erarbeitung eines Vorschlags zur Integration der Bewertungsmethodik in das Gesamtkonzept des HKC-Hochwasserpasses
- hochaufgelöste Modellierung und numerische Simulation von lokalen Quartieren (Gebäude + umgebendes Grundstück) unter Betrachtung ober- und unterirdischer Strömungsprozesse und deren Interaktion
- Beispielhafte Anwendung und Evaluierung der Bewertungsmethodik (u. a. Aussagekraft, praktische Anwendbarkeit, Umsetzbarkeit, zukünftige Erfordernisse)

2. Sonstiges

Die Arbeit ist in gedruckter Form in mindestens zweifacher Ausfertigung beim Prüfungsamt der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden einzureichen. Die Hinweise zur Diplomarbeit in der gültigen Studien- und Prüfungsordnung der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden sind ebenso zu beachten wie die Hinweise des betreuenden Instituts. Mit dem/der Betreuer:in ist pro Bearbeitungsmonat mindestens eine Konsultation zu vereinbaren. Eine Zwischenpräsentation ca. nach der Hälfte der Bearbeitungszeit ist durchzuführen.

Erstprüfer, TU Dresden: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm

Zweitprüfer, TU Dresden: Dr.-Ing. Torsten Heyer

Wissenschaftlicher Betreuer, TU Dresden: Lars Backhaus M.Sc. (IWD)

Betriebliche Ansprechpartner: Helene Meyer M.Sc. (HKC)
(Dipl.-Hydrol. Georg Johann (ORGA))

.....
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm
Verantwortlicher Hochschullehrer

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Antonia Hippel, dass ich die vorliegende Diplomarbeit mit dem Thema „Analyse von Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung auf Gebäudeebene mittels zweidimensionaler, hydrodynamisch-numerischer Modelle“ eigenständig angefertigt und keine Quellen oder Hilfsmittel außer den angegebenen verwendet habe.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsinstitution vorgelegt und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.

Dresden, 21.11.2023

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Hippel', with a long horizontal flourish extending to the right.

Antonia Hippel

Kurzfassung

Aufgrund der durch den Klimawandel immer häufiger auftretenden Extremwetterereignisse Dürre und Starkregen sind Gebäude- und Grundstückseigentümer:innen von Auswirkungen durch Überflutungen und trockenen Böden betroffen. Um sich vor diesen zu schützen, kann eine Bewertung der Gefahrenlage von Gebäuden und ihren Grundstücken erfolgen, auf deren Basis entsprechende Maßnahmen je nach Gefährdung empfohlen werden. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung und stellt einen Maßnahmenkatalog auf Gebäudeebene bereit. Um die Gefahrenlage durch Dürre und Starkregen für Gebäude(-grundstücke) zu bewerten und passende Maßnahmen aus dem Katalog zu empfehlen, wird eine Bewertungsmethodik erstellt. Zur Untersuchung der Wirksamkeit der Maßnahmen wird ein zweidimensionales, hydrodynamisch-numerisches Modell genutzt, welches ein 100-jähriges Starkregenereignis vor und nach durchgeführten Maßnahmen in einem Untersuchungsgebiet abbildet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung auf Gebäudeebene einen Effekt auf die Auswirkung der Gefährdung durch Dürre und Starkregen haben. Unterstützend muss der Objektschutz an Gebäuden gegen Starkregen empfohlen werden.

Abstract

The incidence of extreme weather events, including drought and heavy rainfall, has increased significantly due to climate change, which affects property owners. To protect against such risks, it is important to evaluate and recommend suitable measures, depending on the building's risk profile. This thesis presents various building-level measures aimed at increasing the water infiltration and storage. In addition, a comprehensive catalogue of measures is introduced in this thesis. To evaluate the risk of drought and heavy rainfall on buildings and recommend appropriate measures from a catalogue, an evaluation methodology was developed. To assess the effectiveness of the measures, a two-dimensional, hydrodynamic-numerical model that simulates a 100-year heavy rainfall event both before and after the measures within a limited study area was used. The results show an effect of the measures to increase water infiltration and storage at building level on the impact of drought and heavy rainfall hazards. In addition, the protection of buildings against heavy rain must be recommended.

Bibliografischer Nachweis

Forschungseinrichtung:	Technische Universität Dresden Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
Bearbeiterin:	Antonia Hippel
Thema:	Analyse von Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung auf Gebäudeebene mittels zweidimensionaler, hydrodynamisch-numerischer Modelle <i>Analysis of measures to increase water infiltration and storage at the building level using two-dimensional, hydrodynamic-numerical models</i>
Erscheinungsjahr:	2023
Seitenanzahl:	59
Anzahl der Abbildungen:	17
Anzahl der Tabellen:	1
Anzahl der Literaturquellen:	56
Schlagwörter:	Wasserversickerung, Wasserspeicherung, Klimaanpassungsmaßnahmen, Dürre, Starkregen, Oberflächenabflusssimulation

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XIV
1. Einleitung	1
1.1 Problembeschreibung und Motivation	1
1.2 Zielstellung und Methodik	2
2. Theoretische Grundlagen	5
2.1 Dürre	5
2.2 Starkregen.....	6
2.3 Wasserversickerung	7
2.4 Wasserspeicherung.....	8
2.5 Gebäudebewertungstools	9
3. Maßnahmen auf Gebäudeebene	13
3.1 Maßnahmen zur Steigerung der Wasserspeicherung	13
3.2 Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung.....	16
3.3 Maßnahmenkatalog	18
4. Bewertungsmethodik	21
4.1 Gebäudekategorisierung	21
4.2 Bewertung der Gefahrenlage ohne durchgeführte Maßnahmen.....	21
4.2.1 Gefährdungspotenzial Dürre	21
4.2.2 Gefährdungspotenzial Starkregen	23
4.2.3 Gesamtbewertung	25
4.3 Empfehlung von Maßnahmen	25
4.3.1 Maßnahmen Dürre	25
4.3.2 Maßnahmen Starkregen	26
4.4 Bewertung der Gefahrenlage nach durchgeführten Maßnahmen	26
4.5 Bewertungsmatrix.....	27
4.6 Integration der Bewertungsmatrix in den <i>Hochwasser-Pass</i>	28
5. Modellierung	29
5.1 Untersuchungsgebiet.....	29
5.2 Grundlagen	31
5.3 3Di – Modell	33
5.3.1 Aufbau.....	33
5.3.2 Rasterdaten	34

5.3.3	SQLite.....	37
5.4	Maßnahmenempfehlung.....	38
5.5	Simulation.....	40
6.	Ergebnisse	43
6.1	Gefahrenlage vor durchgeführten Maßnahmen.....	43
6.2	Gefahrenlage nach durchgeführten Maßnahmen	47
7.	Diskussion.....	53
7.1	Wirksamkeit der Maßnahmen.....	53
7.2	Modellierungsreflektion	55
7.3	Evaluierung der Bewertungsmethodik.....	56
7.4	Integration in den <i>Hochwasser-Pass</i>	56
8.	Fazit.....	59
	Literaturverzeichnis	60
	Anhang	67
	Anhang A.....	67
	Digitaler Anhang	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bewertungsschema des <i>Hochwasser-Passes</i> zur objektbezogenen Gefährdungsanalyse durch Starkregen (Quelle: Schulung "Sachkundige(r) <i>Hochwasser-Pass</i> ").....	11
Abbildung 2: Fließdiagramm zur Bewertung des Gefährdungspotenzials durch Dürre auf Gebäudegrundstücken (Quelle: eigene Darstellung).....	23
Abbildung 3: Fließdiagramm zur Bewertung des Gefährdungspotenzials durch Starkregen an Gebäuden und deren Grundstücken (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an die vom HKC entwickelte Bewertungsmethodik im <i>Hochwasser-Pass</i> -Konzept).....	24
Abbildung 4: Gesamtbewertung der Gebäudegrundstücke inklusive Maßnahmenempfehlung nach Gefahrenlage (Quelle: eigene Darstellung).....	27
Abbildung 5: Bewertung der Gebäude(-grundstücke) nach Gefahrenlage durch Dürre und Starkregen im untersuchten Gebiet vor Durchführung von Maßnahmen (Quelle: eigene Darstellung).....	30
Abbildung 6: Starkregenhinweiskarte eines seltenen Starkregens im Untersuchungsgebiet (Quelle: LANUV)	31
Abbildung 7: Ablauf der Erstellung von Modell und Simulation mit <i>3Di</i> (Quelle: eigene Darstellung nach <i>3Di</i>).....	33
Abbildung 8: Rasterdatengrundlage für die Modellierung (Quelle: eigene Darstellung mit Daten des GEOportal.NRW)	35
Abbildung 9: Untersuchungsgebiet mit den untersuchten Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung (Quelle: eigene Darstellung).....	40
Abbildung 10: Fließgeschwindigkeit 60 min nach Beginn des Starkregens von 41,3 mm/h vor Durchführung der Maßnahmen (Quelle: eigene Darstellung).....	44
Abbildung 11: Wasserstand vor Durchführung der Maßnahmen im untersuchten Gebiet nach 15, 30, 60 und 90 min (Quelle: eigene Darstellung).....	45
Abbildung 12: Fließmengen vor Durchführung der Maßnahmen im untersuchten Gebiet in m ³ (Quelle: eigene Darstellung).....	46

Abbildung 13: Wasserverhalten im untersuchten Gebiet vor Durchführung der Maßnahmen (Quelle: 3Di Ausgabe der Simulation).....	47
Abbildung 14: Fließgeschwindigkeit 60 min nach Beginn des Starkregens von 41,3 mm/h nach Durchführung aller untersuchten Maßnahmen (Quelle: eigene Darstellung)	48
Abbildung 15: Wasserstand während eines einstündigen Starkregens von 41,3 mm/h nach Durchführung der Maßnahmen nach 30, 60 und 90 min (Quelle: eigene Darstellung) ...	50
Abbildung 16: Fließmengen im Untersuchungsgebiet nach Durchführung aller Maßnahmen in m ³ (Quelle: 3Di Ausgabe der Simulation)	51
Abbildung 17: Wasserbalance im Untersuchten Gebiet nach Durchführung aller Maßnahmen (Quelle: eigene Darstellung).....	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Maßnahmenkatalog zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung auf Gebäudeebene mit geminderter Gefahr (Quelle: eigene Darstellung nach den in den Abschnitten 3.1 und 3.2 genutzten Quellen)	18
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DGM	Digitales Geländemodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
HKC	HochwasserKompetenzCentrum e.V.
HWRM	Hochwasserrisikomanagement
KOSTRA	Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
NRW	Nordrhein-Westfalen
WFS	Web Feature Service

1. Einleitung

1.1 Problembeschreibung und Motivation

Extreme Wetterereignisse nehmen durch den Klimawandel weltweit an Häufigkeit und Intensität zu [1]. Deutschland ist seit einigen Jahren vor allem in den Sommermonaten von außergewöhnlichen Temperaturschwankungen sowie ausbleibenden Niederschlägen betroffen [2]. Grundwasserstände sinken und die Trockenheit der Böden nimmt zu, welche sich auch über die niederschlagsreicheren Wintermonate nicht erholen [3]. Von 2009 bis 2022 waren alle Frühjahre (ausgenommen 2013) in Deutschland „im Durchschnitt trockener als im Klimamittel 1981 – 2010“ [4]. Es kommt zu anhaltenden Dürren sowie plötzlich auftretenden und intensiven Starkregen, die Auswirkungen auf Menschen und Umwelt mit sich bringen [5].

Als Folge der Dürre sind vor allem städtische Wohngebiete von trockenen Böden betroffen, die weniger Wasser aufnehmen können. Dadurch ist bei Starkregenereignissen mit Überflutungen zu rechnen, die durch stark versiegelte Gebiete in den Städten noch verstärkt werden. Dies zeigen unter anderem die Starkregenereignisse im Juni 2023 in weiten Teilen Deutschlands [6]. Es entstanden Schäden an der baulichen Infrastruktur, Gebäude wurden geflutet und Menschenleben waren gefährdet [7], [8]. Auch die Zunahme der von Dürre betroffenen Landkreise in Deutschland ist alarmierend. In mehr als 60 Landkreisen in Deutschland war zwischen 2018 und 2022 „der Boden bis zu einer Tiefe von 1,8 Meter in durchschnittlich zehn Monaten pro Jahr von Dürre betroffen“ [9]. Da insbesondere urbane Gegenden von Trockenheit und Überflutungen betroffen sind, liegt das Augenmerk dieser Arbeit auf privaten Liegenschaften und Gebäuden [7].

Maßnahmen zur Klimaanpassung sollen Gebäudeeigentümer:innen vor den Auswirkungen von Dürre und Starkregen schützen. Insbesondere die Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung an Gebäuden kann die Böden lokal feuchter halten und Starkregeneinflüsse verringern [10]. Welche Maßnahmen an Gebäuden getroffen werden sollten hängt von Randbedingungen, wie beispielsweise der Bauweise und Lage des Gebäudes sowie des Versiegelungsgrades rund um das Gebäude, ab [10]. Um passende Maßnahmen zu empfehlen, muss jedes Gebäude und dessen potenzielle Gefährdung

durch Dürre und Starkregen individuell betrachtet und bewertet werden. Sogenannte Gebäudebewertungstools werden bereits heute in mehreren Ländern genutzt, um die Gefahr an Gebäuden durch Starkregen und Hochwasser zu validieren und Gebäudeeigentümer:innen passende Schutzmaßnahmen zu empfehlen.

In Deutschland ist als Gebäudebewertungstool der vom HochwasserKompetenzCentrum e.V. (HKC) entwickelte *Hochwasser-Pass* bekannt. Er unterstützt Gebäudeeigentümer:innen mit einer *„Standortanalyse, Bewertung und Maßnahmen-Empfehlung für bestehende oder geplante Privat- und Gewerbe-Immobilien gegenüber Starkregen und Hochwasser“* [11]. Im *Hochwasser-Pass*-Konzept sind vier Gefahren berücksichtigt: Flusshochwasser, Starkregen, Grundhochwasser und Kanalrückstau [11]. Es wird diskutiert, Dürre in die Gefahrenbewertung mit aufzunehmen und die Maßnahmenempfehlungen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung stärker einzubinden.

Die Wirksamkeit der Maßnahmen ist eine elementare Erkenntnis, die aus dieser Arbeit gezogen werden soll. Insbesondere der natürliche Rückhalt und die Nutzung des Bodens als Wasserspeicher ist bereits weit erforscht [12], [13]. Somit sind Maßnahmen zur Wasserversickerung und -speicherung durch die Literatur zu ermitteln. Die (modellbasierte) Untersuchung der Wirksamkeit einer blau-grünen Infrastruktur ist durch verschiedene Ansätze grundlegend erforscht, beispielsweise die Wirksamkeit von Schwammstadtansätzen zur Reduzierung von Überflutungen durch Starkregen [10], [14]. Besonders die Wirksamkeit auf Gebäudeebene und in Bezug auf Dürren ist jedoch lediglich lückenhaft erforscht und ein wichtiger Teil der in dieser Arbeit zu untersuchenden Themen.

1.2 Zielstellung und Methodik

Ziel der Diplomarbeit ist die Analyse der Effektivität von Maßnahmen zur Minderung der Auswirkungen durch Starkregen und Dürre an Gebäuden. Auf Grundlage einer eigenständig entwickelten Methodik erfolgt die Bewertung der Gefahrenlage an Gebäuden durch Dürre und Starkregen, die daraus resultierende Empfehlung von Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung und schließlich die Bewertung der Gefahrenlage an Gebäuden nach Durchführung dieser Maßnahmen an Gebäuden. In einem gewählten Untersuchungsgebiet wird die Effektivität der durchgeführten Maßnahmen an

Gebäuden modellbasiert geprüft und bewertet. Als Untersuchungsgebiet dient ein definierter Bereich der Siedlung Waldschule in Eschweiler in Nordrhein-Westfalen (NRW).

Zur Beantwortung der Frage, welche Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung an Gebäuden existieren, wird zunächst auf Grundlage einer Literaturrecherche ein Maßnahmenkatalog erstellt. Mit Hilfe einer Bewertungsmethodik in Form eines Fließdiagramms wird die Gefahrenlage an Gebäuden vor Durchführung der Maßnahmen zur Minderung der Auswirkungen durch Starkregen und Dürren untersucht. Auf Basis dessen wird auch die Empfehlung von geeigneten Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung für das jeweilige Gebäude in die Bewertungsmethodik integriert, damit schließlich eine Bewertung der Gefahrenlage am Gebäude nach Umsetzung der Maßnahmen erfolgen kann. Die Anwendung und Bewertung der Methodik erfolgen mit Hilfe eines zweidimensionalen, hydrodynamisch-numerischen Modells. Zunächst wird die Gefahrenlage konkreter Gebäude beispielhaft bewertet und die Methodik angewandt. Mittels der Software *3Di Water Management* wird schließlich eine numerische Simulation dieser Gebäudebeispiele erstellt, mit der die Auswirkungen von Starkregen und Dürre mit und ohne Maßnahmen dargestellt und bewertet werden kann. Genutzt werden hierfür öffentlich zugängliche Daten zu Boden und Gelände vom GEOportal.NRW¹ sowie Starkregendaten aus der vom Deutschen Wetterdienst (DWD) öffentlichen Koordinierten Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertungs (KOSTRA) – Tabelle². Untersucht wird die Siedlung Waldschule in Eschweiler aus den KAHR³-Projektgebieten in NRW, in der einzelne Gebäude analysiert und bewertet werden. Weiterführend können die entwickelte Bewertungsmethodik und der Maßnahmenkatalog als Grundlage dienen, um eine mögliche Implementierung in den *Hochwasser-Pass* vorzubereiten. Die Diplomarbeit ist eingebettet in das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt KAHR und wird vom HKC unterstützt.

¹ <https://www.geoportal.nrw/?activetab=map>

² <https://www.openko.de/>

³ KAHR – Klima-Anpassung, Hochwasser und Resilienz: Ein vom BMBF gefördertes Projekt, welches sich mit der „Wissenschaftliche(n) Begleitung der Wiederaufbauprozesse nach der Flutkatastrophe in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen: Impulse für Resilienz und Klimaanpassung“ [15] beschäftigt.

2. Theoretische Grundlagen

Dürre und Starkregen bringen Folgen für die Umwelt und insbesondere private Liegenschaften mit sich. Für das weitere Verständnis ist es notwendig, Dürre und Starkregen zu erklären und ihre Ursachen zu erläutern. Um sich vor Auswirkungen zu schützen, können Maßnahmen getroffen werden, welche ebenfalls erläutert werden. Aufbauend darauf werden die Prozesse der Wasserversickerung und -speicherung und deren Effekte auf die Umwelt erläutert. Außerdem wird auf bereits genutzte Gebäudebewertungstools eingegangen und der *Hochwasser-Pass* vorgestellt.

2.1 Dürre

Eine Dürre lässt sich als ein sich *„langsam aufbauendes, temporäres Wasserdefizit in einem bestimmten Gebiet“* definieren [16]. Es wird von einem Mangel an Wasser gesprochen [17]. Die Zeitskala, in der eine Dürre auftritt, kann von Wochen über Monate bis Jahre dauern. Je nach Andauer wird nach dem DWD unterschieden in [17]:

- meteorologische Dürre (ein bis zwei Monate trockener als üblich),
- landwirtschaftliche Dürre (zwei Monate und länger trocken, Ernteeinbußen),
- hydrologische Dürre (ab vier Monate, Grundwasser und Pegel betroffen)
- sozio-ökonomische Dürre (ab einem Jahr, Wassermangel bremst produzierende Wirtschaft).

Das Wasserdefizit entsteht durch geringen Niederschlag und hohe Temperaturen. Die erhöhte Temperatur verursacht eine erhöhte Verdunstung, wodurch dem Boden Feuchtigkeit entzogen wird, und dieser austrocknet [17]. Neben der steigenden Temperatur und den ausbleibenden Niederschlägen spielen auch die Bodenverdichtung und Flächenversiegelung eine große Rolle, da sie die Wasseraufnahme- und Speicherfähigkeit der Böden verringern [18].

Die Folgen von Dürren zeigen sich insbesondere im hydrologischen Bereich. Es kommt zu einer geringeren Bodenfeuchte und Wasserstände sinken sowohl im Oberflächengewässer als auch im Grundwasser [19]. Dies hat Einfluss auf den gesamten Wasserhaushalt,

wodurch die Wasserversorgung der Vegetation und damit die Biodiversität gefährdet wird. Zudem entstehen auch wirtschaftliche Schäden, die den forst- und landwirtschaftlichen, den hydrologischen sowie den sozioökonomischen Bereich betreffen [19]. Anhaltende Dürren führen in Deutschland seit einigen Jahren vermehrt zu Wald- und Feldbränden. Die Brände in der Sächsischen Schweiz und in Berlin-Grunewald sorgten 2022 für großflächige Schäden [2]. Auch die Schiffbarkeit von Bundeswasserstraßen kann aufgrund der Niedrigwasserstände eingeschränkt sein, durch die Verminderung des Gütertransports wird die Wirtschaft negativ beeinflusst [20]. Im städtischen Bereich wird zudem der sommerliche Wärmeinseleffekt verstärkt, da „*ausgetrocknete Böden keine kühlende Wirkung mehr entfalten können*“ [3]. Aufgrund des Dürrestresses der Vegetation bleiben Zellwachstums und Photosynthese aus, so dass die Pflanzen vertrocknen und nicht mehr zur Abkühlung des urbanen Klimas beitragen können [21]. Das bedeutet eine erhöhte Wärmebelastung für Stadtbewohner:innen und die Gefahr von Hitzestress [22].

Aufgrund der Erwärmung der Atmosphäre kann auch in Deutschland die Zunahme von Dürren erwartet werden [3]. Um sich lokal an Dürren anzupassen, werden in *Kapitel 3* Maßnahmen auf Gebäudeebene beschrieben. Diese sollen durch eine Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung Boden und Wasserhaushalt schützen.

2.2 Starkregen

Als Starkregen wird eine große Niederschlagsmenge je Zeiteinheit bezeichnet [23]. Im Verhältnis zu seiner Dauer weist er eine hohe Intensität auf [24].

Starkregen kann an jedem Ort auftreten und wird vom DWD in drei Stufen eingeteilt [23]:

- Regenmengen 15 bis 25 l/m² in 1 Stunde oder 20 bis 35 l/m² in 6 Stunden (Markante Wetterwarnung)
- Regenmengen > 25 bis 40 l/m² in 1 Stunde oder > 35 l/m² bis 60 l/m² in 6 Stunden (Unwetterwarnung)
- Regenmengen > 40 l/m² in 1 Stunde oder > 60 l/m² in 6 Stunden (Warnung vor extremem Unwetter).

Das Potenzial für Starkregen nimmt zu, sobald es zur Erwärmung der Atmosphäre kommt und somit das Aufnahmevermögen der Luft von Wasserdampf höher ist [3]. Die steigende Temperatur infolge des Klimawandels in Deutschland hat einen Einfluss auf Starkregeneignisse [7]. In den letzten 70 Jahren hat die Intensität und die Häufigkeit von Starkregentagen (definiert als $> 20 \text{ l/m}^2$) geringfügig zugenommen und auf Basis von Klimaprojektionen wird davon ausgegangen, dass sich diese Neigung fortsetzt [25].

Da die obere Bodenschicht bei Starkregen schnell gesättigt ist, kommt es auch abseits von Gewässern zu erhöhtem oberflächlichem Abfluss und einer Überlastung der Entwässerungssysteme [7]. Auch die Versiegelung von Flächen sorgt für einen erhöhten oberflächlichen Abfluss. In steileren Gebieten kann es zudem zu Sturzfluten und Bodenerosionen kommen [10]. All diese Faktoren können pluviale Überflutungen, Grundhochwasser und Überflutungen durch Kanalrückstau verursachen und verschlimmern [10]. Die Folge sind unter anderem schwere Schäden an der baulichen Infrastruktur. Damit zukünftig Schäden vermindert werden, müssen Gebäude und Grundstücke angepasst werden [7].

Um das durch Starkregen anfallende Wasser zu binden und zu nutzen, gilt es besonders die im Stadtgebiet verfügbaren Flächen zu entsiegeln und mit Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung auszustatten [7]. Dazu zählen im öffentlichen Bereich beispielsweise die Nutzung von Rückhaltebecken sowie die in *Kapitel 3* behandelten Maßnahmen im privaten Bereich.

2.3 Wasserversickerung

Wasser versickert in der Regel in den Boden. Ist dies der Fall, nimmt die Bodenfeuchte zu und Dürren werden verringert [10]. Wasser versickert vertikal von oben nach unten in den Boden und je nach Wasseranfall, Boden und Klima unterschiedlich schnell [26]. Auch Korngröße und Korngrößenverteilung des Bodens haben Einfluss auf die Wasseraufnahmekapazität [27]. So ist beispielsweise die Versickerungsfähigkeit von Kies- und Sandböden sehr gut, während Lehm und Ton schnell gesättigt sind und weniger Wasser durchlassen [27]. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Versickerung durch eine schnelle Sättigung der obersten Bodenschicht bei Starkregen begrenzt ist [10].

Grundsätzlich gilt, dass unversiegelte Flächen den Abfluss verringern, da Wasser leichter versickern kann. Als Versiegelung versteht sich die teilweise bis völlige Abdichtung der Bodenoberfläche [28]. Eine zunehmende Urbanisierung und die hohe Flächeninanspruchnahme für Versiegelungsflächen reduzieren das Versickerungspotenzial. Im Vergleich zu Rasenflächen läuft das Wasser auf asphaltierten Flächen deutlich schneller und in größerer Menge oberflächlich ab, was Überflutungen zur Folge hat [7]. Insgesamt sind in Deutschland fast 13 % der Flächen als sogenannte Siedlungs- und Verkehrsflächen versiegelt [28]. Folge einer solchen Versiegelung ist die Beeinträchtigung der natürlichen Bodenfunktion als Bestandteil des Naturhaushalts [28].

Da eine zunehmende Wasserversickerung in den Boden eine höhere Bodenfeuchte und die Neubildung des Grundwassers fördert, wirkt sie sich positiv auf das Mikroklima aus, so dass Auswirkungen von Dürre und Starkregen vermindert werden können [10]. Die Reduzierung von Versiegelungsflächen auf einer Liegenschaft kann Überflutungen durch Starkregen vermindern [7]. Die Gestaltung einer Liegenschaft hat daher maßgeblich Einfluss auf das Mikroklima sowie die Auswirkungen von Dürre und Starkregen [10].

2.4 Wasserspeicherung

Die Wasserspeicherung ist eine Möglichkeit Wasser zu binden, um es nach dem Regenereignis gezielt abzuleiten und das Entwässerungssystem zu entlasten [29]. Die Speicherung des Wassers in Böden wirkt Erosion entgegen. Zudem wird das Wasser für das Pflanzenwachstum gespeichert und trägt zur Grundwasserneubildung bei [12]. Neben der natürlichen Speicherung in Böden ist auch der Rückhalt durch technische Anpassungen möglich. Dabei wird das Wasser ganz oder teilweise über Speicher zurückgehalten, verzögert abgegeben und bei Bedarf als Brauchwasser genutzt.

Häusliches Brauchwasser kann unter anderem für die Gartenbewirtschaftung oder für die Bewirtschaftung sanitärer Anlagen wie Toiletten oder Waschmaschinen im Gebäude genutzt werden, sodass der Frischwasserverbrauch reduziert wird und sich ein positiver Effekt auf Umweltpotentiale ergibt [10]. Die Rückhaltung des Wassers ist zudem eine entscheidende Komponente zum Schutz vor Dürre und Starkregen [10]. Die Nutzung des gespeicherten Wassers und die verzögerte Abgabe von überschüssigem Wasser entlastet in Extremsituationen das gesamte System [10]. Je nach Einzugsgebiet und Speicherkapazität

können Böden und Gebäude durch den Rückhalt des Wassers vor Trockenheit und Überflutungen geschützt werden [7].

Speicher können sich ober- oder unterirdisch, beispielsweise im Kanalnetz, auf Dächern, in Mulden oder auf Straßen, befinden, müssen aber in jedem Fall vor Wärme, Frost und Licht geschützt werden. Aus dem Verhältnis zwischen Brauchwasserbedarf und Regenwasserertrag berechnet sich das Speichervolumen [10].

2.5 Gebäudebewertungstools

Die Einbeziehung von Gebäudeeigentümer:innen in das Hochwasserrisikomanagement (HWRM) ist essenziell, um sich der steigenden Gefahr durch Hochwasserereignisse anzupassen. Das fehlende Bewusstsein rund um das Thema Hochwasser sorgt jedoch oftmals dafür, dass Gebäudeeigentümer:innen unzureichende Vorsorgemaßnahmen treffen [30]. Daher gibt es in Deutschland und auch darüber hinaus in Europa verschiedene Gebäudebewertungstools, um den Eigentümer:innen Wissen über ihr Gebäude zu vermitteln [31]. Für Deutschland wurde der *Hochwasser-Pass* vom HKC und das Bewertungstool *FLOOD.Bi* sowie der *Hochwasservorsorgeausweis* aus Sachsen untersucht. Darüber hinaus wurden die Tools *BlueLabel* und *Overstroomik.nl* aus den Niederlanden, *Watertoets* aus Belgien sowie *Floodtoolkit* und *Know Your Flood Risk* aus England auf ihre Unterschiede und Gemeinsamkeiten mit den beiden Tools aus Deutschland verglichen [31]–[35]. Alle untersuchten Gebäudebewertungstools haben das Ziel Gebäudeeigentümer:innen in hochwassergefährdeten Gebieten zu sensibilisieren und zu motivieren, sich vor Überflutungen zu schützen. Dafür bekommen die Anwender:innen der Tools eine erste Gefährdungseinschätzung für ihre Gebäude. Hier können Unterschiede zwischen den untersuchten Tools ausgemacht werden. Die berücksichtigten Parameter für die Gefährdungseinschätzung unterscheiden sich. In einigen Tools wird eine detaillierte Standortanalyse vor Ort durchgeführt. Bei den Tools *Hochwasser-Pass* und *Hochwasservorsorgeausweis* bewertet ein Sachkundiger persönlich vor Ort das Gebäude und berät Eigentümer:innen. Dadurch können Eigentümer:innen über potentielle Hochwasserrisiken und damit verbundene, geeignete Schutzmaßnahmen informiert werden [32]. Andere Tools, wie *FLOOD.Bi*, bewerten das Gebäude auf Grundlage der Adresse und sind ausschließlich eine Web-Plattform. Damit unterscheidet sich auch die Empfehlung der Maßnahmen, die nur durch den persönlichen

Kontakt gebäudespezifisch empfohlen werden können. Des Weiteren unterscheiden sich die Einsatzgebiete der Tools, *FLOOD.Bi* aus Sachsen kann nur regional genutzt werden, wobei der *Hochwasser-Pass* deutschlandweit verfügbar ist.

Für diese Arbeit ist, wie in Abschnitt 1.1 dargelegt, ein ausführliches Verständnis des *Hochwasser-Pass*-Konzeptes notwendig. Mit dem vom HKC entwickelten *Hochwasser-Pass* wird durch einen Sachkundigen eine Standortanalyse und eine Bewertung der Überflutungsgefahren Flusshochwasser, Starkregen, Kanalrückstau und Grundhochwasser für das jeweilige Gebäude vor Ort vorgenommen. Die Gefährdungslage der Gebäude wird in vier Gefährdungskategorien (keine, geringe, mittlere, hohe Gefährdung) abgebildet.

Abbildung 1 zeigt das Bewertungsschema des *Hochwasser-Passes* zur objektbezogenen Gefährdungsanalyse durch Starkregen. Hier wird die Kategorie „keine Gefährdung“ nicht berücksichtigt, da Starkregen überall auftreten kann. Im Bewertungsschema werden die topografische Lage des Grundstücks, die vorliegende Grundstücksentwässerung und die Eindringwege in das Gebäude berücksichtigt. Sofern die topografische Lage und die Grundstücksentwässerung unauffällig sind besteht eine geringe Gefährdung des Gebäudes. Ist dies nicht der Fall, ist die Gefährdung des Gebäudes hoch, wenn die Eindringwege unter 10 cm sind, und mittel, wenn die Eindringwege über 10 cm sind.

Anschließend empfiehlt der *Hochwasser-Pass*-Sachkundige gebäudespezifische Maßnahmen aus dem *Hochwasser-Pass*-Maßnahmenkatalog [11]. Die Gefahrenlage der Gebäude wird nach der Umsetzung der empfohlenen Maßnahmen neu bewertet. Im Maßnahmenkatalog des *Hochwasser-Passes* ist als Maßnahme zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung bisher nur die Nutzung von Staumulden zur großflächigen Versickerung integriert [36]. Ein fehlender Aspekt in allen untersuchten Bewertungstools (siehe oben) ist die Berücksichtigung der Risikoeinschätzung durch Dürre an Gebäuden, sowie eine umfangreiche Maßnahmenempfehlung zur Steigerung von Wasserversickerung und -speicherung. Daher hat die vorliegende Arbeit das Ziel, ein Konzept zur möglichen Integration dieser Aspekte zu erarbeiten, um eine umfassende Risikoeinschätzung und Maßnahmenempfehlung zur Klimaanpassung zu ermöglichen.

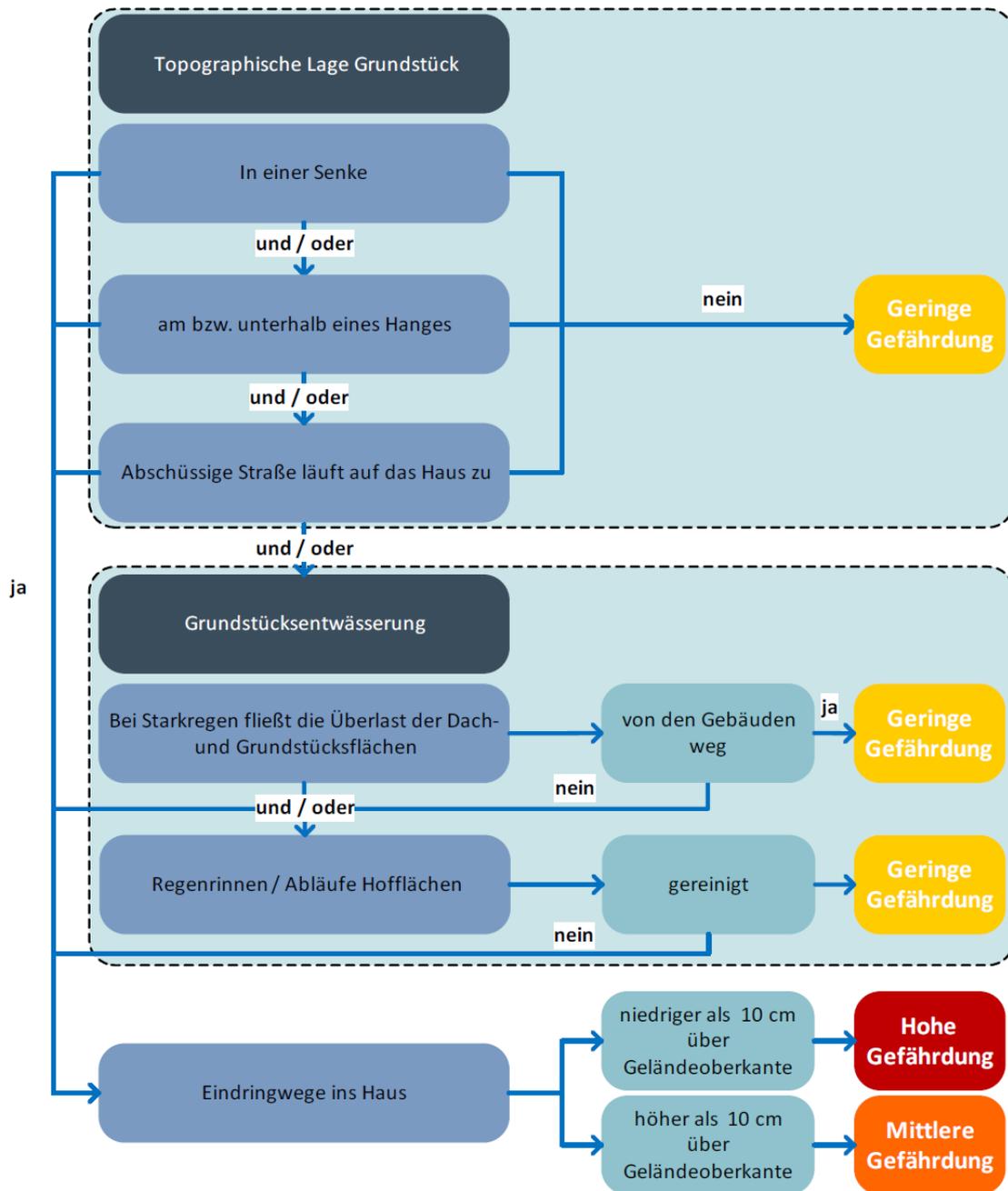


Abbildung 1: Bewertungsschema des *Hochwasser-Passes* zur objektbezogenen Gefährdungsanalyse durch Starkregen (Quelle: Schulung "Sachkundige(r) Hochwasser-Pass")

3. Maßnahmen auf Gebäudeebene

Die Wasserversickerung und -speicherung kann am Gebäude durch verschiedene Maßnahmen gesteigert werden. Eine Maßnahme allein wird allerdings nicht in der Lage sein, ein Grundstück gänzlich vor Dürre und Starkregen zu schützen. Bei sehr intensiven Starkregenfällen können einzelne Maßnahmen an ihre Grenzen kommen, weshalb sie nur eine Teilkomponente von urbanen Regenwassermanagementsystemen darstellen sollten. Grundsätzlich gilt daher, dass eine Kombination mehrerer Maßnahmen zu empfehlen ist, um ein nachhaltiges Regenwassermanagement zu schaffen [37]. Das Kapitel stellt abschließend eine Zusammenfassung der möglichen Maßnahmen in einem Katalog dar.

3.1 Maßnahmen zur Steigerung der Wasserspeicherung

Zur Steigerung der Wasserspeicherung an Gebäuden kommen die Rückhaltung am Gebäude oder auf der Fläche sowie die Nutzung von Mulden und Speicherbecken in Frage. Ziel der Maßnahmen ist die Zurückhaltung, Speicherung und die verzögerte Abgabe des Wassers während eines Starkregenereignisses, um die Kanalisation zu entlasten und es in Dürrephasen als Brauchwasser zu nutzen. Im Folgenden werden die Maßnahmen detailliert erläutert.

Rückhaltung am Gebäude

Die Rückhaltung am Gebäude kann über eine Begrünung des Daches oder der Fassade erfolgen. Die Begrünung hat „*vielfältige Wirkungen, die für das einzelne Gebäude und die einzelne Liegenschaft die negativen Folgen des Klimawandels abmildern können*“ [3]. Sie leistet einen Beitrag zur Anpassung an Hitze und Strahlung und fördert die Biodiversität [38]. Durch den Kühlungseffekt der Pflanzen kann die unmittelbare Oberflächen- und Umgebungstemperatur um bis zu 3 °C abgesenkt werden [37]. Begrünungen nehmen über die Versickerung und über die Pflanzen (Stark-)Regenwasser auf und geben es verzögert ab, sodass es in hohem Maß zu einer Abflussverzögerung und einer Entlastung der Kanalisation kommt [37]. Die Rückhaltung am Gebäude ist vor allem dann sinnvoll, wenn das Grundstück in weiten Teilen bebaut ist und eine Speicherung auf dem restlichen Grundstück nur schwer möglich ist, wie es in urbanen Gebieten oft der Fall ist [10].

Die Dachbegrünung wird unterschieden in extensive und intensive Dächer. Extensive Dächer werden mit hitze-, kälte- und trockenresistenten Pflanzen bepflanzt, welche niedrig wachsen und anspruchslos sind [37]. Die Aufbauhöhe dieser Dächer liegt zwischen 8 und 15 cm und kann auch auf Steildächern mit einem maximalen Neigungswinkel von 45° installiert werden [37]. Zu den extensiven Dächern zählen die Systemlösungen *Spardach* und *Naturdach* [39]. Das *Spardach* besitzt eine Sedum-Kraut-Vegetation, hat einen Gesamtaufbau von 8 cm und hält ca. 25 l/m² zurück [29], [39]. Das *Naturdach* wird mit einer Sedum-Gras-Kraut-Vegetation bepflanzt, hat einen Gesamtaufbau von 10 cm und hält 30 l/m² zurück [29], [39]. Intensive Dächer werden mit höheren und anspruchsvolleren Pflanzen, wie Stauden und Gehölze, bepflanzt, sodass ein Aufbau von mindestens 25 cm notwendig ist, wodurch sich diese Begrünung nur für Flachdächer und leicht geneigte Dächer eignet [37]. Die Systemlösungen *Gartendach* und *Landschaftsdach* gehören zu den intensiven Dächern [39]. Das Gartendach wird mit einer Stauden-Gehölze-Vegetation bepflanzt, hat einen Gesamtaufbau von 30 cm und hält bis zu 130 l/m² zurück [29], [39]. Das Landschaftsdach dagegen hat eine Stauden-Bäume-Vegetation, einen Gesamtaufbau von 60 cm sowie einen Wasserrückhalt von 250 l/m², was ca. 90 % der jährlichen Regenwassermenge entspricht und damit die Lösung mit dem höchsten Rückhalt ist [29], [39]. Je nach Schichtaufbau, System und Niederschlagsregion nehmen begrünte Dächer also eine bestimmte Menge an Wasser auf und geben das Überschusswasser zeitverzögert an die Kanalisation oder Versickerungsanlagen ab [29].

Die Fassadenbegrünung wird unterschieden in eine bodengebundene oder fassadengebundene Begrünung. Bei der bodengebundenen Begrünung besteht eine Verbindung zum gewachsenen Boden und die Pflanzen klettern mit oder ohne Rankhilfen die Wand hoch [40]. Die Wasserversorgung erfolgt über natürliche Einträge in den Boden [41]. Bei der fassadengebundenen Begrünung dagegen erfolgt die Bepflanzung in Pflanzgefäßen an Tragkonstruktionen, modularen Systemen oder flächige Konstruktionen an der Außenwand [40]. Die Wasserversorgung erfolgt über eine automatische Anlage [41].

Rückhaltung auf der Fläche

Eine wichtige Maßnahme zum Schutz vor Dürre und Starkregen ist die weitgehende Versiegelung der Oberflächen des Grundstücks mit gleichzeitiger Schaffung grüner sowie

blauer Infrastrukturen [38]. (Stark-)Regenwasser kann auf der Fläche versickern und im Boden zurückgehalten und gespeichert werden [42]. Diese Speicherung bringt einen großen Flächenbedarf mit sich, sodass diese Möglichkeit der Speicherung vor allem in ländlichen Gegenden und auf großen Grundstücken Anwendung findet [42].

Die Entsiegelung und Begrünung von Flächen hat zum einen eine große Bedeutung für den Artenschutz und der Erhaltung der Biodiversität und zum anderen bietet sie Boden- und Gewässerschutz [3]. Das Wasser kann durch die Entsiegelung versickern und der oberflächliche Abfluss sinkt. Empfohlen wird eine Reduzierung möglichst vieler bestehender versiegelter Flächen, sodass diese Flächen (Stark-)Regenwasser aufnehmen und speichern können [42]. Nur dort, wo aufgrund der Nutzung eine Versiegelung nötig ist, sollte diese bestehen bleiben [42]. Die Entsiegelung von Hofflächen kann beispielsweise mit Rasengittersteinen erfolgen [43]. Nicht genutzte Flächen oder Wege sollten entsiegelt werden. Für Terrassen oder notwendige Wege wird die Nutzung von versickerungsfähigen Pflastersteinen oder anderen Bodenbelägen empfohlen. Die Speicherfähigkeit und -kapazität des Bodens ist abhängig von der Bodenart und ist vor allem bei gesättigten Böden eher gering [42]. Gut durchlässige Böden, wie beispielsweise sandige oder kiesige Böden, sind nötig, um eine Speicherung im Boden zu ermöglichen [42].

Die Rückhaltung des Wassers auf der Fläche kann auch über blaue Infrastrukturelemente wie Seen, Teiche oder Wasserläufe erfolgen. Bietet das Grundstück den nötigen Platz, sind dies Möglichkeiten, (Stark-)Regenwasser zu speichern und aufzunehmen. Zudem schaffen sie in trockenen Perioden eine kühlende Wirkung auf die Umwelt und können zur Bewässerung grüner Elemente dienen. Blaue Infrastrukturelemente eignen sich gut, um beispielsweise überschüssiges (Stark-)Regenwasser von Gründächern aufzunehmen. Es kann sich zudem auch um eine vorübergehende Rückhaltung handeln, bei der Flächen gezielt geflutet werden und zeitweise nicht oder nur eingeschränkt genutzt werden können. Das (Stark-)Regenwasser wird vom Gebäude weggeleitet und beispielsweise in Wasserläufen zeitweise gespeichert [10].

Mulden

Retentionsmulden eignen sich zur zwischenzeitlichen Speicherung von (Stark-)Regenwasser. Es handelt sich dabei um flache begrünte Geländevertiefungen, in die das Wasser

eingeleitet wird. Liegt auf dem Grundstück ein Gefälle Richtung Gebäude vor, können Mulden und Senken das Gebäude schützen, indem sie oberflächlich abfließendes Wasser auffangen und vom Gebäude weggleiten. Auch eine Zuleitung über Rohre kann integriert werden, sodass das Wasser von mehreren Orten auf dem Grundstück in der Mulde gespeichert wird. Je nach Größe der Mulde kann es zu hohen Wasserständen und einer großen Menge zurückgehaltenem Wasser kommen. Die maximale Tiefe von 30 cm sollte nicht überschritten werden. Da Retentionsmulden 10 bis 20 % der angeschlossenen Fläche einnehmen sollten, haben sie einen großen Flächenbedarf und eignen sich daher vor allem für große Grundstücke. Als Alternative für kleine Grundstücke mit wenig Platz eignen sich möglicherweise stattdessen kleine Gräben, die weniger (Stark-)Regenwasser halten. Mulden lassen sich zudem gut mit Gründächern kombinieren, die ihr überschüssiges (Stark-)Regenwasser über Rohre in die Mulden leiten [10] [27].

Speicherbecken

Ist aufgrund von Platzmangel eine oberirdische Speicherung auf dem Grundstück nicht möglich, eignen sich Speicherbecken wie unterirdische Zisternen, Regentonnen oder Tanks in ungenutzten Kellerräumen. Über Rohre wird das (Stark-)Regenwasser in das jeweilige Speicherbecken geleitet. Unterirdische Speicher können auch bei starkem Gefälle installiert werden, wenn das Wasser je nach Lage im Gelände mittels Pumpen in die Zisternen befördert wird. Das Wasser kann als häusliches Brauchwasser für Toiletten, Waschmaschinen oder zur Gartenbewirtschaftung genutzt werden. Dadurch sinkt der Frischwasserverbrauch und anfallendes (Stark-)Regenwasser kann in Dürreperioden genutzt werden, was sich positiv auf Umweltpotentiale auswirkt. Die Speicherkapazität der Speicherbecken ist abhängig von der Größe des jeweiligen Beckens [10].

3.2 Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung

Rückhaltung auf der Fläche

Wie in Abschnitt 3.1 bereits beschrieben, ist die Rückhaltung auf der Fläche eine essenzielle Maßnahme zum Schutz vor Dürre und Starkregen, sofern das Grundstück den Platz bietet. Die Entsiegelung und Begrünung begünstigt die Versickerung von (Stark-)Regenwasser und hat einen positiven Einfluss auf den Wasserhaushalt. Die Versickerung des (Stark-)Regenwassers findet genau auf der Fläche statt, auf der es anfällt. Ein gut bis mäßig

durchlässiger Untergrund ist maßgebend, damit das Wasser in den Boden versickern kann. Besonders gut geeignet sind Grasflächen, weil sie aufgrund ihrer dichten Durchwurzelung für eine ständige Regenerationsfähigkeit der Sickerfläche sorgen. Ist der Boden nach einer länger anhaltenden Regenperiode zu gesättigt nimmt er das (Stark-)Regenwasser nicht mehr auf und es kann zu Überflutungen kommen [42] [27].

Versickerungsmulden

Neben der Wasserspeicherung durch Retentionsmulden (siehe Abschnitt 3.1) gibt es zusätzlich die Möglichkeit das zwischenzeitlich gespeicherte (Stark-)Regenwasser in diesen Mulden versickern zu lassen. Auch hier handelt es sich um flach begrünte Vertiefungen im Gelände, in die das Wasser von allen Seiten geleitet wird. Durch die bewachsene und durchlässige Oberbodenschicht kann das Wasser versickern, was eine gute biologische Reinigung bewirkt. Wie auch bei der Versickerung auf der Fläche ist die Bodenart entscheidend, um eine Aussage über die Versickerungsfähigkeit treffen zu können. Der Flächenbedarf liegt zwischen 10 bis 20 % der angeschlossenen Fläche und eine Tiefe von 30 cm sollte nicht überschritten werden, daher ist die Umsetzung vor allem in ländlichen Gegenden auf großen Grundstücken möglich [10], [27], [42].

Schachtversickerung

Die Schachtversickerung erfolgt punktförmig über einen Sickerschacht, in den das (Stark-)Regenwasser unterirdisch hineingeleitet wird, um dort zwischengespeichert zu werden und anschließend über die Wände und die offene Kieselsohle des Schachtes zu versickern. Sickerschächte benötigen nur wenige Quadratmeter an Fläche und sind besonders bei wenig durchlässigen Oberbodenschichten geeignet. Da eine Reinigungsleistung des Wassers nicht erfolgt wird diese Maßnahme vor allem für die Versickerung von unverschmutztem Regenwasser von Gründächern empfohlen [27], [42].

Rigolen

Bei Rigolen handelt es sich um unterirdische Speicher in denen (Stark-)Regenwasser gespeichert wird und verzögert in den Untergrund versickert. Diese Speicher können mit Grobkies oder Schotter gefüllte Versickerungsgräben oder industriell vorgefertigte Kunststoffrigolen sein. Da keine Durchströmung einer bewachsenen Oberbodenschicht erfolgt,

wird das Wasser nicht gereinigt. „Daher dürfen nur unbedenkliche verschmutzte Flächenabflüsse in eine Rigole eingeleitet werden“ [44]. Die Rigolen-Versickerung eignet sich vor allem bei geringem Platzbedarf und für die Versickerung von Dachflächenwasser. Verbindet man die Rigolen-Versickerung mit einer unterirdischen Zuleitung des (Stark-)Regenwassers über einen in Kies eingebetteten Rohrstrang in die Rigolen, spricht man von Rohr-Rigolen-Versickerung. Eine weitere Version ist die Mulden-Rigolen-Versickerungen. Diese befindet sich unterhalb einer Versickerungsmulde und ist ein mit Grobkies gefüllter Versickerungsgraben, in dem eine Zwischenspeicherung und anschließende Versickerung des (Stark-)Regenwassers stattfindet. Die Versickerung erfolgt zunächst über die Mulde und anschließend über die Wände und Sohle der Rigole. Dadurch wird das Wasser gereinigt in die durchlässigen Schichten des Bodens geleitet. Sie benötigen etwa 5 bis 15 % der angeschlossenen Fläche [27], [42], [44].

3.3 Maßnahmenkatalog

In Tabelle 1 sind zusammenfassend alle zuvor erläuterten Maßnahmen in einem Katalog dargestellt. Neben den einzelnen Maßnahmen wird aufgelistet, ob eine Steigerung der Wasserversickerung oder -speicherung erfolgt und ob mit einer Minderung der Gefahr durch Dürre oder Starkregen zu rechnen ist.

Tabelle 1: Maßnahmenkatalog zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung auf Gebäudeebene mit geminderter Gefahr (Quelle: eigene Darstellung nach den in den Abschnitten 3.1 und 3.2 genutzten Quellen)

Nr.	Maßnahme	Prozess	Gefahr	Informationen
Rückhaltung am Gebäude				Kühlungseffekt, Steigerung Biodiversität
1	Extensives Gründach	Speicherung	Dürre	8-15cm Aufbau, Neigungswinkel max. 45°
2	Spardach	Speicherung	Dürre	8cm Aufbau, 25l/m ² Rückhalt
3	Naturdach	Speicherung	Dürre	10cm Aufbau, 30 l/m ² Rückhalt
4	Intensives Gründach	Speicherung	Dürre / Starkregen	ab 25cm Aufbau, Flachdach/leicht geneigte Dächer
5	Gartendach	Speicherung	Dürre / Starkregen	30cm Aufbau, 130l/m ² Rückhalt
6	Landschaftsdach	Speicherung	Dürre / Starkregen	60cm Aufbau, 250l/m ² Rückhalt
7	Fassadenbegrünung	Speicherung	Dürre	Kühlungseffekt

Maßnahmen auf Gebäudeebene

Rückhaltung auf der Fläche				
8	Entsiegelung von versiegelten Flächen	Speicherung / Versickerung	Dürre / Starkregen	Minderung Abfluss, Bodenschutz
9	Begrünung	Speicherung / Versickerung	Dürre	Kühlungseffekt, Artenschutz, Boden-/Gewässerschutz
10	Blaue Infrastrukturelemente	Speicherung	Dürre / Starkregen	z.B. See, Teich, Wasserläufe - Kühlungseffekt
Mulden				
11	Retentionsmulde	Speicherung	Starkregen	Wasser gezielt zu Senken/Mulden im Grundstück leiten
12	Versickerungsmulde	Speicherung / Versickerung	Dürre/Star kregen	hoher Platzbedarf, mittlere bis hohe Speicherkapazität, guter Einfluss auf Wasserhaushalt
Speicherbecken				
13	Zisterne	Speicherung	Dürre / Starkregen	
14	Regentonnen	Speicherung	Dürre / Starkregen	
15	Tank im Keller	Speicherung	Dürre / Starkregen	
16	Schachtversickerung	Versickerung	Dürre / Starkregen	geringer Platzbedarf, mittlere-hohe Speicherkapazität, schlechter Einfluss auf Grundwasser
Rigolen				
17	Rigolen-Versickerung	Versickerung	Dürre / Starkregen	geringer Platzbedarf, hohe Speicherkapazität, mittlerer Einfluss auf Grundwasser
18	Rohr-Rigolen-Versickerung	Versickerung	Dürre / Starkregen	mittlerer Platzbedarf, mittlere Speicherkapazität, mittlerer Einfluss auf Grundwasser
19	Mulden-Rigolen-Versickerung	Versickerung	Dürre / Starkregen	mittlerer bis hoher Platzbedarf, hohe Speicherkapazität, guter Einfluss auf Wasserhaushalt

4. Bewertungsmethodik

Im Folgenden wird eine Bewertungsmethodik hergeleitet, welche zur Bewertung der Gefahrenlage an Gebäuden durch Dürre und Starkregen sowie zur passenden Maßnahmenempfehlung dient. Nach erfolgter Maßnahmenempfehlung können die Gebäudegrundstücke erneut bewertet und eingeordnet werden.

4.1 Gebäudekategorisierung

Damit eine Anwendung der Bewertungsmethodik erfolgen kann, ist zunächst wichtig zu erläutern, welche Art von Gebäuden mit der Bewertungsmethodik angesprochen werden. Grundsätzlich lassen sich Gebäude in Wohngebäude und Nichtwohngebäude einteilen. Wohngebäude werden überdies in Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser und nach Baujahr klassifiziert [45]. Die Nichtwohngebäude werden unterteilt in verschiedenen Bereiche der Nutzung. Dazu gehören Büro- und Verwaltungsgebäude, Fabriken und Werkstätten, Landwirtschaftliche Betriebe, Anstaltsgebäude, Handelsgebäude, Warenlager sowie Hotel und Gaststätten [46]. Die Bewertungsmethodik richtet sich hier vor allem auf Grundstücke mit Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden im kleingewerblichen Bereich.

4.2 Bewertung der Gefahrenlage ohne durchgeführte Maßnahmen

Die Bewertung der Gefahrenlage an Gebäuden ohne zuvor durchgeführte Maßnahmen erfolgt mit der Dokumentation der Gefährdungspotenziale durch Dürre und Starkregen auf den jeweiligen Gebäudegrundstücken. Sind beide Aspekte untersucht, wird das Gesamtgefährdungspotential des Gebäudegrundstücks ermittelt.

4.2.1 Gefährdungspotenzial Dürre

Die Gefahren an Gebäuden und auf deren Grundstücken durch Dürre sind in Abschnitt 2.1 bereits beschrieben. Ob ein Gebäudegrundstück von trockenen Böden und mangelndem Wasservorrat betroffen ist, lässt sich zunächst durch die Dürregefährdung der Region festmachen. Wie aus Abbildung 2 ersichtlich wird, stellt sich zunächst die Frage, welche Bodenfeuchte in der Umgebung des Grundstücks vorliegt. Diese ist in öffentlich zugänglichen Karten zu finden, welche für Deutschland über den Dürremonitor

des Helmholtz Zentrums für Umweltforschung (UFZ) und beispielsweise für NRW über den Klimaatlas des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) zur Verfügung stehen [47], [48]. Liegt eine Dürre in dem Gebiet vor, wird auch das Grundstück des Gebäudes betroffen sein und es kommt zu einer hohen Gefährdung. Ist jedoch nur eine leichte Dürre oder gewöhnliche Trockenheit in der Region vorhanden, lässt sich mit weiteren Faktoren wie der Bodenversiegelung oder Wasserspeichermöglichkeiten festmachen, ob ein Grundstück von Dürre gefährdet ist (siehe Abbildung 2). Bei einer starken Versiegelung des Grundstückes in einer urbanen Gegend kann davon ausgegangen werden, dass die obere Bodenschicht und gegebenenfalls die tieferen Bodenschichten darunter sehr trocken sind, weil kein Wasser versickern kann, und es liegt eine hohe Gefährdung durch Dürre vor. Ist ein Grundstück dagegen größtenteils mit versickerungsfähigem Untergrund versehen, wird sich dies positiv auf den Boden- und Wasserhaushalt auswirken und die Gefährdung sinkt. Die Speicherung von (Stark-)Regenwasser ermöglicht es in Dürrephasen weiterhin für eine Bewässerung des Bodens und der Pflanzen zu sorgen. Dadurch sinken auch die Auswirkungen von Dürren geringfügig, weil kein Wassermangel besteht; die Gefährdung des Grundstückes ist gering. Sind keine Speichermöglichkeiten vorhanden, kann bei gleichzeitig geringer Versiegelung mit einer mittleren Gefährdung durch Dürren gerechnet werden. Die Kernfragen, die für die Bewertung der Gefährdungspotenziale durch Dürre also gestellt werden, sind, wie im Fließdiagramm in Abbildung 2 dargestellt, die nach der Bodenfeuchte in der Region und den bestehenden Versickerungs- sowie Speichermöglichkeiten.

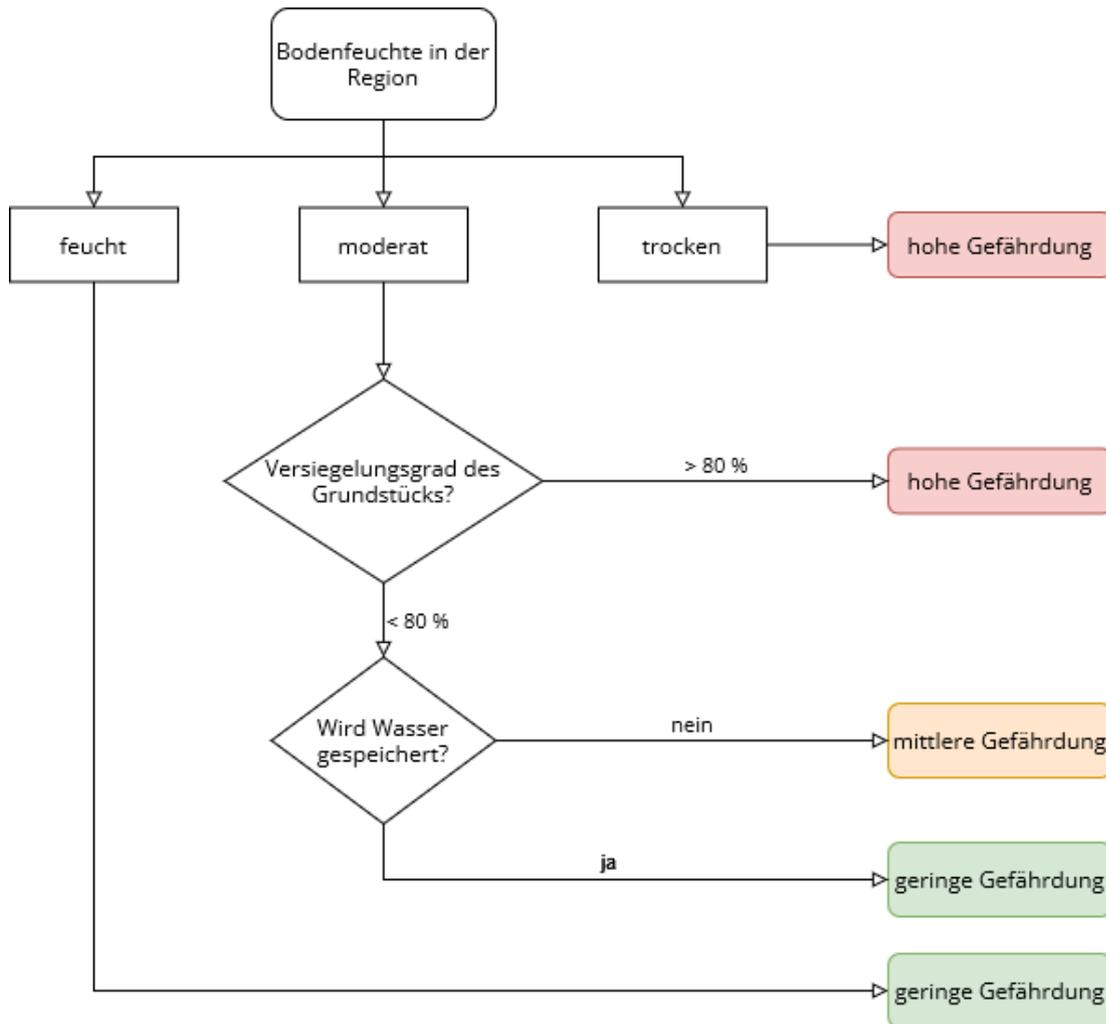


Abbildung 2: Fließdiagramm zur Bewertung des Gefährdungspotenzials durch Dürre auf Gebäudegrundstücken (Quelle: eigene Darstellung)

4.2.2 Gefährdungspotenzial Starkregen

Durch Starkregen kommt es zu Gefahren wie einer Überflutung des Gebäudes und Grundstücksflächen. Randbedingungen wie die Topografie des Grundstücks, Entwässerungsmöglichkeiten und Versiegelungsgrade geben Auskunft darüber, welche oberflächlichen Abflüsse auf dem Grundstück entstehen und ob daraus resultierend Starkregenwasser in das Gebäude eindringen kann (siehe Abbildung 3). Liegt ein Gebäude in einer Senke oder unterhalb eines Hanges oder läuft eine abschüssige Straße auf das Gebäude hinzu, so steigt die Gefährdung einer Überflutung, weil sich (Stark-)Regenwasser am Gebäude aufstaut. Zudem kommt es durch verunreinigte Regenrinnen oder Abläufen zu überschüssigem (Stark-)Regenwasser, welches nicht abfließt und sich ebenfalls aufstaut. Dadurch steigt die Gefährdung des Gebäudes. Besteht zusätzlich ein hoher Versiegelungsgrad des Grundstücks, sodass (Stark-)Regenwasser nicht versickern kann, und es

sind keine Speichermöglichkeiten vorhanden, besteht eine hohe Gefährdung des Gebäudes. Die Gefährdung sinkt, wenn die Eindringwege in das Gebäude mindestens 10 cm über der Geländeoberkante (GOK) liegen und es Versickerungsflächen und Speichermöglichkeiten gibt. Das Fließdiagramm in Abbildung 3 stellt die Kernfragen zur Bewertung der Gefährdung durch Starkregen an Gebäuden dar. Das Bewertungsschema ist dem *Hochwasser-Pass* Konzept entnommen und um den Versiegelungsgrad und Speichermöglichkeiten ergänzt worden.

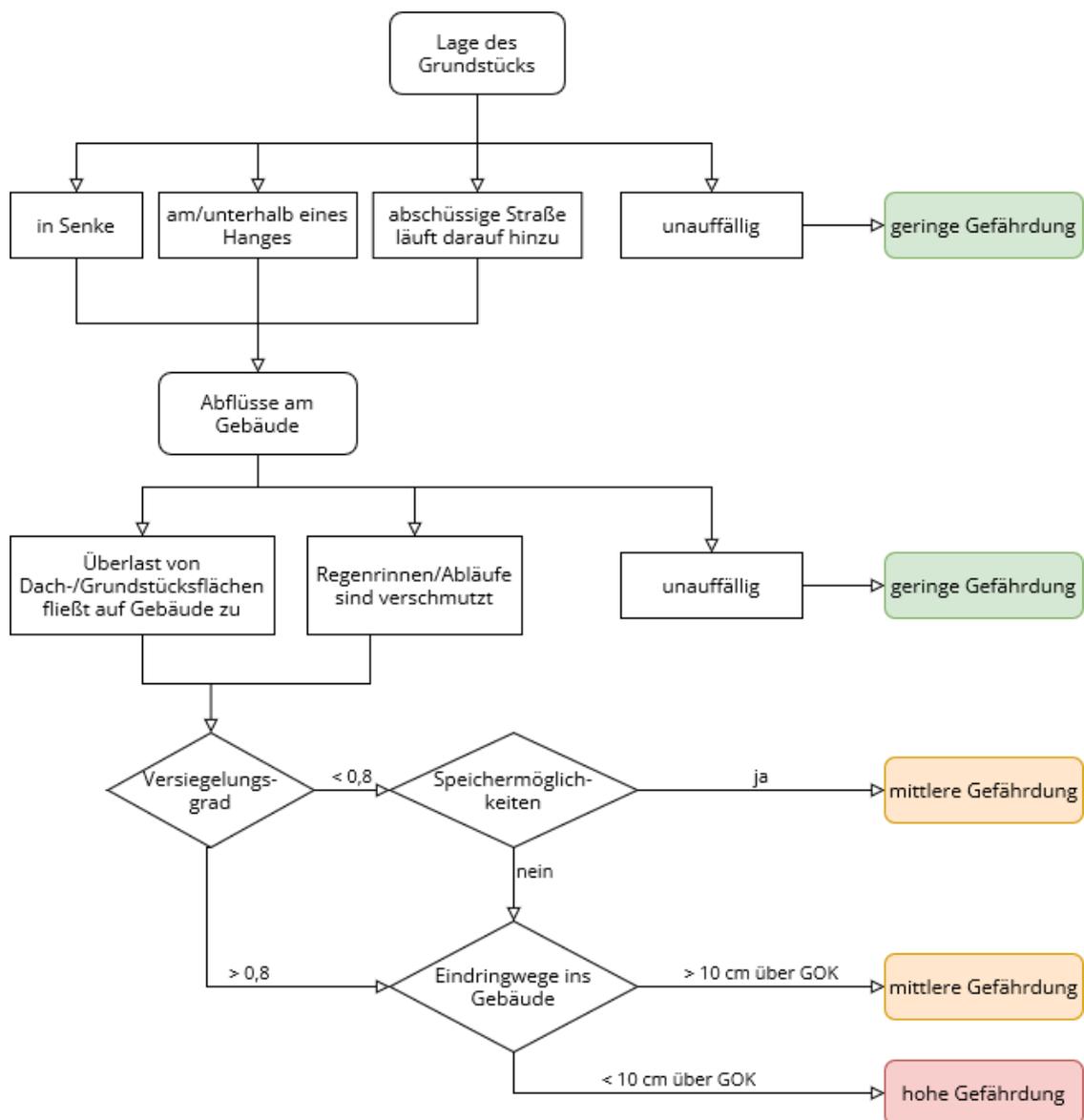


Abbildung 3: Fließdiagramm zur Bewertung des Gefährdungspotenzials durch Starkregen an Gebäuden und deren Grundstücken (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an die vom HKC entwickelte Bewertungsmethodik im *Hochwasser-Pass*-Konzept)

4.2.3 Gesamtbewertung

Nachdem die getrennte Bewertung der Gefahrenpotenziale durch Dürre und Starkregen erfolgt ist, kann das Gebäude eine Gesamtbewertung nach Abbildung 4 erhalten. Zu beachten ist, dass immer ein Restrisiko besteht und damit mindestens eine geringe Gefährdung vorliegt. Die höchste zuvor ermittelte Gefährdung durch Dürre oder Starkregen ist für die Gesamtbewertung maßgebend und nimmt die Gesamtbewertung ein. Ist beispielsweise die Gefährdung am Gebäude durch Dürre zwar gering, aber durch Starkregen hoch, so ist auch die Gesamtgefährdung des Gebäudes hoch. Zu beachten ist ebenfalls, dass es sich bei der Bewertungsmethodik und der Einteilung in die Gefährdungen um eine quantitative Bewertung handelt.

4.3 Empfehlung von Maßnahmen

Je nach Gefährdung können verschiedene Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung zum Schutz vor den Auswirkungen von Dürre und Starkregen getroffen werden. Je nach eingestufte Gefährdung werden diese unterteilt. Es handelt sich bei der Bewertungsmethodik um eine quantitative Bewertung für alle Gebäude. Daher gilt auch hier, dass jedes Gebäude und Grundstück, insbesondere aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen, individuelle Maßnahmenempfehlungen erhalten kann. Die Einteilung nach Gefährdung kann dennoch als Orientierung genutzt werden. Erwähnt werden sollte auch, dass neben diesen aufgeführten Maßnahmen viele weitere Maßnahmen, insbesondere zum Schutz vor Starkregen (z.B. Hochborde, Strömungsabweiser, mobiler Hochwasserschutz), möglich und sinnvoll sind. Diese sind jedoch für diese Arbeit nicht relevant und beziehen sich nicht auf die Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung.

4.3.1 Maßnahmen Dürre

Zum Schutz vor Folgen einer Dürre können je nach Gefährdung mehrere Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung empfohlen werden. Im Falle einer geringen Gefährdung können der Rückhalt am Gebäude und auf der Fläche nützlich sein. Die Begrünung und Entsiegelung lässt (Stark-)Regenwasser für Dürreperioden besser speichern und versickern. Liegt eine mittlere Gefährdung vor, kann zusätzlich die Integ-

rierung von Speicherbecken auf dem Grundstück empfohlen werden. Zisternen oder Regentonnen fangen das (Stark-)Regenwasser auf, sodass dieses während einer Dürre genutzt werden kann. Besteht eine hohe Gefährdung, ist möglicherweise der zusätzliche Einsatz von Versickerungsmulden und Rigolen eine Möglichkeit, um Wasser zu speichern und die Böden feucht zu halten. Wichtig zu beachten ist, dass die Maßnahmenempfehlungen bei einer geringen Gefährdung auch bei einer mittleren und hohen Gefährdung sinnvoll sind.

4.3.2 Maßnahmen Starkregen

Je nach Gefährdung am Gebäude durch Starkregenereignisse können auch hier unterschiedliche Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung empfohlen werden. Der Rückhalt auf der Fläche und am Gebäude wird ab einer geringen Gefährdung empfohlen. Die Entsiegelung lässt das Starkregenwasser langsamer abfließen und Retentionsdächer geben das Starkregenwasser verzögert ab. Zusätzlich dazu wird bei einer mittleren Gefährdung die Nutzung von Speicherbecken und Rigolen zur verzögerten Wasserabgabe und einer Entlastung der Kanalisation empfohlen. Im Falle einer hohen Gefährdung sind Retentionsmulden sinnvoll, um das Wasser zurückzuhalten und das Gebäude vor einer Überflutung zu schützen. Auch hier gilt, dass die Maßnahmenempfehlungen bei einer geringen Gefährdung auch bei einer mittleren und hohen Gefährdung nützlich sind.

4.4 Bewertung der Gefahrenlage nach durchgeführten Maßnahmen

Werden die empfohlenen Maßnahmen realisiert und am Gebäude umgesetzt, so kann eine erneute Bewertung des Gebäudes und Grundstücks erfolgen. Die Gefährdung sinkt, je mehr der empfohlenen Maßnahmen durchgeführt werden. Je nach Maßnahme kann der Einfluss auf die Gefährdungsminderung unterschiedlich groß sein. Die Bewertung der Gefahrenlage nach durchgeführten Maßnahmen kann erneut mit Hilfe der Fließdiagramme in den Abbildungen 2 bis 4 erfolgen.

4.5 Bewertungsmatrix

Für eine allumfassende Darstellung des Bewertungsablaufs wird in Abbildung 4 die Gesamtbewertung der Gebäudegrundstücke mit den zugehörigen empfohlenen Maßnahmen dargestellt. Die Einordnung der Gefahrenlage durch Dürre und Starkregen wird aus den in Abschnitt 4.2 behandelten Einzelbewertungen übernommen. Damit ergibt sich die Gesamtbewertung des Gebäudegrundstücks und abschließend die Maßnahmenempfehlung nach Gefahrenlage.

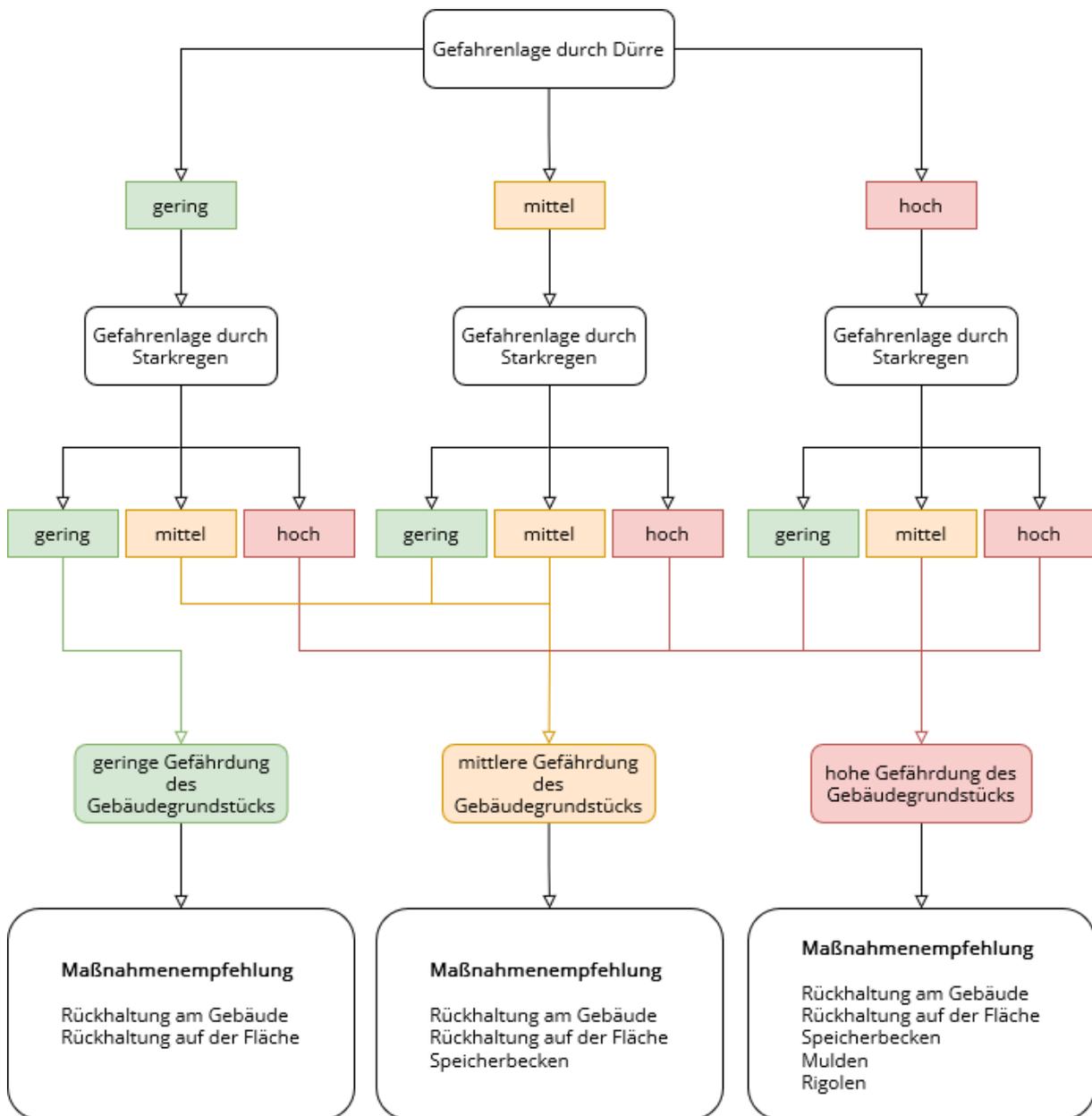


Abbildung 4: Gesamtbewertung der Gebäudegrundstücke inklusive Maßnahmenempfehlung nach Gefahrenlage (Quelle: eigene Darstellung)

4.6 Integration der Bewertungsmatrix in den *Hochwasser-Pass*

Die entwickelte Bewertungsmethodik soll in das *Hochwasser-Pass*-Konzept des HKC integriert werden können. Aufbauend auf den bestehenden Bewertungsschemata aus dem *Hochwasser-Pass*-Konzept wurde die Methodik weiterentwickelt. Das Bewertungsschema für Starkregen wurde überprüft und mit der Versiegelung und Wasserspeicherung erweitert. Die Bewertung der topografischen Lage des Grundstücks und die Grundstücksentwässerung wurde übernommen und durch die Untersuchung des Versiegelungsgrad und der Speichermöglichkeiten ergänzt. Anschließend wird auch die Bewertung anhand der Eindringwege ins Gebäude wie im *Hochwasser-Pass* vorgenommen. Eine Bewertungsmethodik der Gefahrenlage durch Dürre ist im *Hochwasser-Pass*-Konzept bisher nicht vorhanden und wurde eigenständig erarbeitet. Die entwickelte Matrix kann als Grundlage dienen, um die Gefährdungsanalyse der Gebäude(-grundstücke) um Dürre zu erweitern. Darüber hinaus können auch die Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung in den Maßnahmenkatalog aufgenommen werden. Dafür wurden die Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung, die bereits im Maßnahmenkatalog des *Hochwasser-Passes* vorhanden sind, wurden geprüft, übernommen und um weitere ergänzt.

Ziel ist, dass die entwickelte Bewertungsmethodik inklusive Maßnahmenkatalog die Grundlage für eine Erweiterung des *Hochwasser-Passes* darstellt. Während der Erarbeitung wurde beim Vorgehen auf einen ähnlichen Aufbau geachtet, damit eine Weiterentwicklung zur Überführung in das *Hochwasser-Pass*-Konzept möglich ist. Die Ergebnisse aus dieser Arbeit sollen nachhaltig Verwendung finden und in Zukunft in der Praxis eingesetzt werden, um die Klimaanpassung zu fördern.

5. Modellierung

Die entwickelte Bewertungsmethodik wird im Untersuchungsgebiet dieser Arbeit angewendet, indem die Gefahrenlage verschiedener Gebäude bewertet und darauf aufbauende Maßnahmen empfohlen werden. Das Untersuchungsgebiet wird mit Hilfe des Geoinformationssystems *QGIS* sowie des Software-Plugins *3Di* als zweidimensionales hydrodynamisches Modell modelliert. Mit diesem Modell wird ein Starkregenereignis vor und nach Durchführung der Maßnahmen zur Wasserversickerung und -speicherung simuliert. Die empfohlenen Maßnahmen werden auf ihre Wirksamkeit gegen Dürre und Starkregen geprüft.

5.1 Untersuchungsgebiet

Auf Grundlage der Bewertungsmethodik wird das Untersuchungsgebiet in der Siedlung Waldschule in Eschweiler gewählt, weil es sich dabei um ein von Dürre und Starkregen hochgefährdetes Gebiet handelt. Eschweiler liegt östlich von Aachen in NRW und befindet sich im KAHR-Projektgebiet. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Gebäudeebene liegt, werden beispielhaft fünf Gebäudegrundstücke eines kleinen Quartiers der Siedlung (siehe Abbildung 5) untersucht, um die Maßnahmenempfehlung und -prüfung durchzuführen. Die Gebäudegrundstücke liegen im Nordwesten der Siedlung zwischen der Waldstraße im Süden und der Stolberger Straße im Norden. Sie sind nach Anwendung der Bewertungsmethodik in Abbildung 5 nach ihrer Gefährdung farblich in Rot dargestellt und mit Buchstaben A, B, C, D und E beschriftet. Alle Gebäudegrundstücke sind von einer hohen Gefährdung (rot) betroffen. In dem gewählten Gebiet gibt es topografische Unterschiede, das Gelände senkt sich Richtung Nordwesten ab und abschüssige Straßen laufen auf die Gebäudegrundstücke zu.

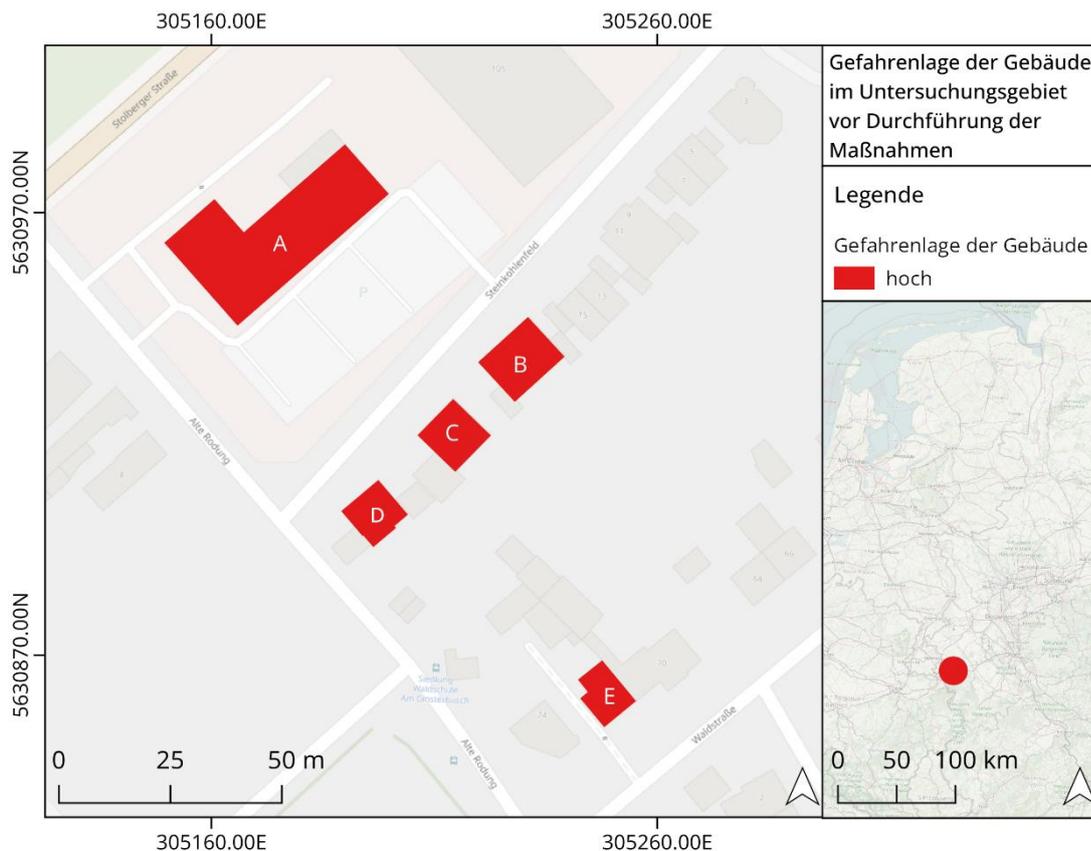


Abbildung 5: Bewertung der Gebäude(-grundstücke) nach Gefahrenlage durch Dürre und Starkregen im untersuchten Gebiet vor Durchführung von Maßnahmen (Quelle: eigene Darstellung)

Die Auswahl und Bewertung der Gebäude erfolgt mit Hilfe der *Klimaanpassungskarte* von NRW des LANUV, dem *GEOportal.NRW* sowie *Google Earth* [47], [49], [50]. Für das untersuchte Gebiet besteht eine Gefährdung durch Starkregenüberflutungen und einer moderaten Dürre [47], [48]. Vor allem die Aufstauung des Niederschlagswassers vor den Gebäuden B und C wird aus den Starkregenhinweiskarten in Abbildung 6 deutlich. Zudem haben die Grundstücke der Gebäude A und E aufgrund der verhältnismäßig großen Hofflächen einen hohen Versiegelungsgrad. Die anderen drei Gebäudegrundstücke (Gebäude B, C, D) sind aufgrund der Gärten wenig versiegelt. Trotzdem sind die drei Gebäude durch das steile Gefälle von Südosten kommend von einer hohen Gefährdung betroffen. Auf Basis dieser Bewertung erfolgt in Abschnitt 5.4 eine Empfehlung von Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung.

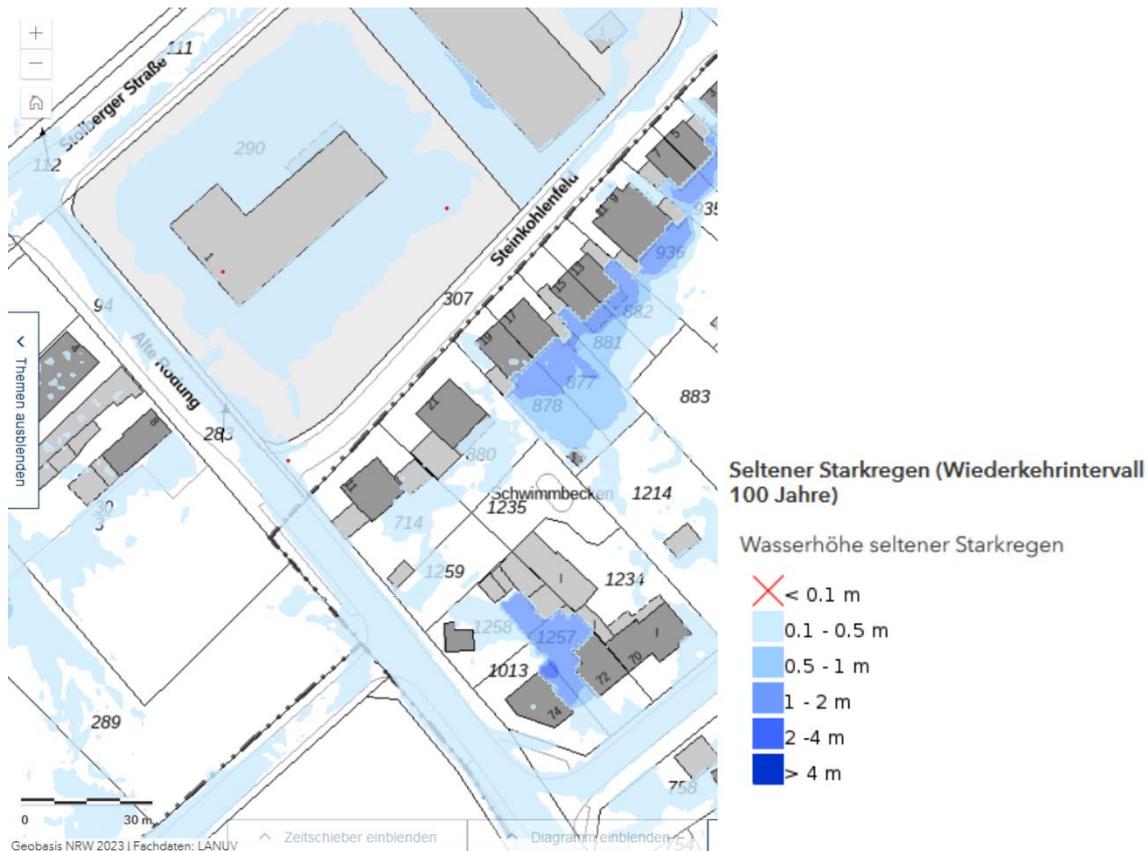


Abbildung 6: Starkregenhinweiskarte eines seltenen Starkregens im Untersuchungsgebiet (Quelle: LANUV)

5.2 Grundlagen

Für die Simulation und Untersuchung von Starkregenereignissen werden zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modelle genutzt. Diese basieren auf geobasierten Daten der Region. Darunter zählen digitale Geländemodelle, die Oberflächenrauheit und die Infiltrationsrate, welche die Strömungsprozesse bei einem Starkregenereignis beeinflussen (siehe Abschnitt 5.3.2). Neben Informationen über die Region werden auch lokale Starkregendaten genutzt, welche aussagen, wie viel Wasser auf das Untersuchungsgebiet trifft.

Die Untersuchung der Wirksamkeit der Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung erfolgt anhand zweier Situationen: Zum einen dem Zustand vor Durchführung von Maßnahmen und zum anderen dem Zustand, nachdem Maßnahmen umgesetzt wurden. Das ermöglicht die Analyse der Auswirkungen von Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung. Ziel der Simulation ist es zu erkennen, worin sich die beiden Zustände unterscheiden und ob die Maßnahmen einen Einfluss auf die Überflutungen und Infiltrationen haben.

Die Modellierung und Simulation erfolgt mit dem Geoinformationssystem *QGIS* und der Software *3Di Water Management*⁴. *QGIS* und *3Di* ermöglichen es, geobasierte Daten sowie Simulationen zu erstellen, darzustellen, zu bearbeiten und verknüpfen und auszuwerten. Die Ergebnisse werden kartografisch dargestellt [51]. Die *3Di* Software wird als Plugin in *QGIS* geladen und kann parallel auch im Browser über die *3Di Management*-Homepage genutzt werden. Die *3Di*-Modellerstellung erfolgt ausschließlich über das *QGIS*-Interface mit Hilfe der *QGIS*-Tools, während die Simulationen und die Visualisierungen sowohl über das Interface als auch über den Browser erfolgen.

In

Abbildung 7 ist der Ablauf der Arbeit mit *3Di* dargestellt. Als Grundlage werden Daten des Untersuchungsgebiet herangezogen. Diese Daten werden verarbeitet, in die Datenbank (*schematisation*) geladen und anschließend in ein *3Di*-Modell verwandelt. Damit äußere Einflüsse und Randbedingungen im Modell berücksichtigt werden, wird dieses größer als das untersuchte Gebiet. Konkret wird der gesamte Bereich der Siedlung Waldschule sowie weitere Bereiche darüber hinaus modelliert. Nach Fertigstellung des Modells erfolgen Simulationen, deren Ergebnisse im *QGIS*-Interface oder über den Browser mit *3Di* dargestellt werden. Mit Hilfe der Ergebnisse entsteht schließlich eine Bewertung der untersuchten Grundstücke und Gebäude, auf deren Grundlage Maßnahmen empfohlen werden. Daraufhin wird mit einer neuen Datengrundlage ein neues Modell und neue Simulationen erstellt, sodass final alle Simulationen verglichen werden können und die Wirksamkeit der Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung geprüft werden kann. In den folgenden Abschnitten 5.3 und 5.4 wird genauer auf die Teilprozesse eingegangen.

⁴ <https://management.3di.live/>

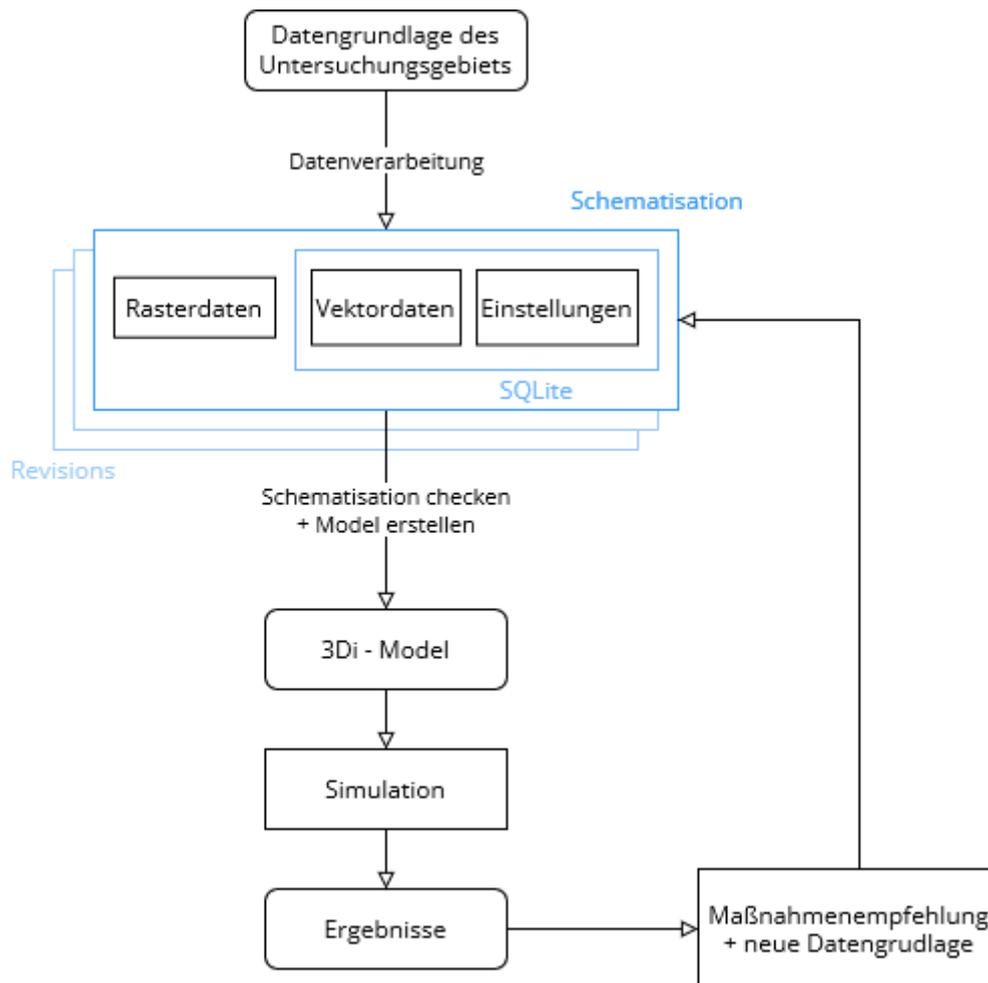


Abbildung 7: Ablauf der Erstellung von Modell und Simulation mit 3Di (Quelle: eigene Darstellung nach 3Di)

5.3 3Di - Modell

Für die Simulation eines Starkregenereignisses ist zunächst die Erstellung eines 3Di-Modells nötig, um die Gebäude mit Hilfe der Bewertungsmethodik zu beurteilen. Auf Basis dessen wird das zweite Modell erstellt, welches mit empfohlenen Maßnahmen ergänzt wird. Der Aufbau der Modelle und die dafür genutzten Daten des Untersuchungsgebiets werden nachfolgend erläutert.

5.3.1 Aufbau

Das 3Di-Modell besteht aus einer Datenbank, welche immer wieder verändert werden kann, sodass ein Modell verschiedene Überarbeitungsschritte (*revisions*) enthält. So werden immer weitere Elemente in die Datenbank hinzugefügt und verschiedene Szenarien entwickelt.

Die Datenbank enthält Rasterdaten sowie ein *SQLite*, bestehend aus vektorbasierten Informationen und Einstellungen (*settings*). Als Grundlage für die Rasterdaten und des *SQLite* dienen geobasierte Daten des Untersuchungsgebiets. Während die Rasterdaten im Vorhinein in *QGIS* vorbereitet werden und als TIFF-Dateien vorliegen müssen, werden die Daten und Einstellungen im *SQLite* direkt in der Datenbank erstellt [52].

Für die finale *3Di*-Modellerstellung ist die Datenbank mit den erfolgten Überarbeitungen von *3Di* auf Fehler zu prüfen. Sind Fehler vorhanden, sind diese zu korrigieren, sodass die Datenbank schließlich fehlerfrei hochgeladen wird und das eigentliche *3Di*-Modell auf dem *3Di*-Server erstellt wird. Mit jeder Überarbeitung und Änderung ist die Datenbank erneut zu prüfen, damit das Modell fehlerfrei aktualisiert wird. Mit dem fertigen Modell erfolgen anschließend die Simulationen, welche in Abschnitt 5.4 beschrieben werden.

5.3.2 Rasterdaten

Ein wichtiger Teil der Datengrundlage für das *3Di*-Modell sind Informationen aus Rasterdaten. Alle genutzten Rasterdaten müssen korrekt übereinander liegen, was bedeutet, dass die Größe, der Koordinatenmittelpunkt sowie die Pixelgröße und -anzahl exakt gleich sind. Gespeichert werden diese jeweils als TIFF-Dateien, damit das Modell auf die Daten zugreifen kann. Die Verarbeitung und das Zuschneiden der Daten erfolgen mit den *QGIS*-Tools. Über die Modelleinstellungen (siehe Abschnitt 5.3.3) werden diese in die Datenbank geladen und miteinander verknüpft. Als Raster werden ein DGM und jeweils ein Raster mit Daten über die Oberflächenrauheit und der Infiltrationsrate genutzt (siehe Abbildung 8).

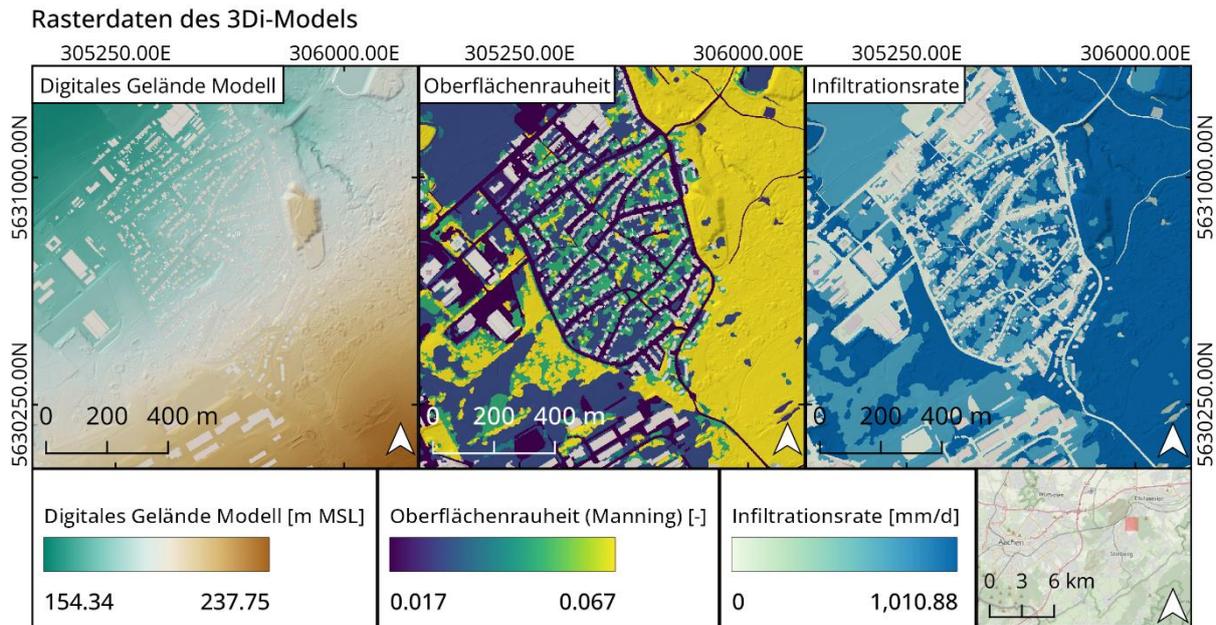


Abbildung 8: Rasterdatengrundlage für die Modellierung (Quelle: eigene Darstellung mit Daten des GEOportal.NRW)

Digitales Gelände Modell

Als Basis eines 3Di-Modells ist immer ein Digitales Gelände Modell (DGM) notwendig. Dieses gibt in einem 1 x 1 m weiten Gitter Informationen über die natürliche Geländeformen der Erdoberfläche [53]. Die Gebäudepolygone sind entfernt, sodass potenzielles (Stark-) Regenwasser nicht über das ursprüngliche Gelände fließt, sondern um die Gebäude herum. Wasser, welches während der Simulationen auf die Gebäude trifft, wird damit vernachlässigt. Das DGM ist als Rasterdatei über das *GEOportal.NRW*⁵ heruntergeladen und auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten (siehe Abbildung 8). Es ist in Lage und Höhe georeferenziert und lässt dadurch den oberflächlichen Abfluss von (Stark-)Regenwasser in dem Untersuchungsgebiet simulieren. Abbildung 8 zeigt ein Gefälle des Geländes von Südosten nach Nordwesten um knapp 100 Höhenmeter. Das untersuchte Gebiet befindet sich circa 170 m über den Meeresspiegel.

⁵ https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/hm/dgm1_xyz/dgm1_xyz/

Oberflächenrauheit (Manning-Beiwert)

Der oberflächliche Abfluss von Wasser wird neben der Geländehöhe auch durch unterschiedliche Rauheiten auf der Oberfläche beeinflusst. Diese definieren sich durch den Bewuchs oder den Bodenbelag. Die Oberflächenrauheit wird in dem 3Di-Modell mit dem Manning-Beiwert in $s/m^{1/3}$ ausgedrückt. Ein Manning-Wert von 0,017 entspricht asphaltierten Straßen oder Wegen und ein Wert von 0,067 dicht bewachsenen Wäldern [54]. Je niedriger die Oberflächenrauheit ist, desto ungestörter kann das Wasser oberflächlich abfließen. Steigt die Oberflächenrauheit, wird das Wasser auf seinen ursprünglichen Fließwegen gehindert und verlangsamt oder umgeleitet, was wiederum Einfluss auf Überflutungen haben kann. Mit Hilfe der Landbedeckung von NRW werden die verschiedenen Oberflächenrauheiten im Untersuchungsgebiet festgestellt. Die Landbedeckung ist wie das DGM über das *GEOportal.NRW*⁶ erhältlich und wird als Web Feature Service (WFS) für ganz NRW heruntergeladen und anschließend auf das Untersuchungsgebiet begrenzt. Sie teilt die Beschaffenheit der Oberfläche mit einer Genauigkeit von 1 bis 2 Metern in 15 Landbedeckungsklassen ein [55]. Unter den Klassen befinden sich der Hochbau und Tiefbau sowie Gewässer und die Vegetation, unterteilt in Gräser, Büsche und Wälder. Abgeleitet von der Landbedeckung werden den jeweiligen Klassen Manning-Werte zugeordnet. Als Rastereingabe wird die in Abbildung 8 erkennbare Einteilung nach dem Manning-Wert für das Untersuchungsgebiet genutzt. Eine geringe Oberflächenrauheit liegt vor allem auf den Straßen und Höfen vor und eine hohe im Waldgebiet im östlichen Bereich des Untersuchungsgebiets. Im Siedlungsbereich ist auf Rasenflächen eine Oberflächenrauheit von 0.029 und in bepflanzten Bereichen von 0.05 gegeben.

Infiltrationsrate

Ebenfalls mit Hilfe der Landbedeckung wird die Infiltrationsrate als Rasterdatei gespeichert. Die Infiltrationsrate gibt Auskunft über die Menge an Wasser, die in den Boden eindringt. Je höher sie ist, desto mehr Wasser nimmt der Boden auf. Sie variiert wie die Oberflächenrauheit je nach Bodenbeschaffenheit. Grundsätzlich gilt, dass unversiegelte Böden mehr Wasser aufnehmen als versiegelte Böden. Anhand der Landbedeckung wird die Art

⁶ https://www.wfs.nrw.de/geobasis/wfs_nw_landbedeckung

der Bodenbeschaffenheit im Untersuchungsgebiet abgelesen und die zugehörige Infiltrationsrate in mm/d festgelegt. Versiegelte Flächen wie asphaltierte Straßen lassen Wasser nicht in den Boden versickern, während bewachsene Waldflächen das Wasser mit 1010,88 mm/d gut aufnehmen. In Abbildung 8 ist die Verteilung der Infiltrationsrate im Untersuchungsgebiet zu sehen, welche auf den Straßen und Hofflächen bei null liegt und zwischen den Gebäuden in der Siedlung vor allem zwischen 717,2 mm/h für Rasenflächen und 1010,88 mm/d für bepflanzte Flächen wechselt [56], [57].

5.3.3 SQLite

Neben den verknüpften Rasterdaten werden für das *3Di*-Modell einige Einstellungen und vektorbasierte Informationen hinzugefügt, welche weitere notwendige Daten in das Modell einbringen. Dieses erfolgt mit einem *SQLite*-Datenbanksystem, welches jederzeit in die *3Di*-Datenbank geladen werden kann.

Einstellungen

Über die verschiedenen Einstellungen im *SQLite* wird das *3Di*-Modell definiert. In den globalen Einstellungen (*global settings*) werden die wesentlichen Einstellungen für das Modell festgelegt. Dazu gehören Eingaben zum Berechnungsnetz, zu genutzten Daten und zur Simulation.

Für das Berechnungsnetz sind Angaben zur kleinstmöglichen Zellgröße (*grid_space*) sowie zur maximalen Anzahl an Vergrößerungen dieser Zellen (*kmax*) festzulegen. Bei einer Zellvergrößerung werden die Maße der Zelle immer verdoppelt, sodass in die nächstgrößere Zelle immer vier von den kleineren Zellen reinpassen. Im Modell wird als kleinstmögliche Zellgröße 2x2 m angegeben und eine maximal fünffache Vergrößerung. Somit können folgende Zellgrößen im Modell vorkommen: 2x2 m, 4x4 m, 8x8 m, 16x16 m, 32x32 m. Je kleiner die Zellen, desto genauer sind die Berechnungsergebnisse, aber desto länger dauert die Berechnungszeit. Das Modell wählt für die Berechnungen immer die größtmögliche Zellgröße, sodass die Berechnungszeit kurz ist. Um das Berechnungsnetz dem Untersuchungsgebiet anzupassen, wird dieses in den vektorbasierten Informationen über die Netzverfeinerungsflächen (*grid refinement area*) optimiert (siehe unten). Neben dem Berechnungsnetz spielen für die Simulationen auch die Berechnungszeitschritte eine Rolle,

welche ebenfalls in den globalen Einstellungen festgelegt werden. Die Simulation erfolgt in Schritten von 5 s, die Ergebnisse werden in Zeitschritten von 300 s ausgegeben.

Die genutzten TIFF-Dateien der Rasterdaten des DGMS und der Oberflächenrauheit werden in den globalen Einstellungen verlinkt, sodass das 3Di-Modell darauf zugreifen kann. Zudem wird eingestellt, dass die einfache Infiltration mitberechnet wird. Hierfür gibt es die Infiltrationseinstellungen (*simple infiltration settings*), in denen die TIFF-Datei des Rasters der Infiltrationsrate verknüpft wird.

Vektorbasierte Informationen

Mit Hilfe von Netzverfeinerungsflächen kann genau angegeben werden, wo welche Zellgröße bestehen soll, sodass das Berechnungsnetz genau auf die untersuchten Bereiche zugeschnitten ist. Für das untersuchte Gebiet sind vor allem kleine Zellen notwendig, um detaillierte Ergebnisse zu erhalten, daher wird dieser Bereich mit der kleinstmöglichen Zellgröße (2x2 m) berechnet. Der Rand des Modells wird mit der größtmöglichen Zellgröße (32x32 m) ausgestattet, da dieser für die Ergebnisanalyse weniger relevant ist. Der gesamte Siedlungsbereich wird mit mittelgroßen Zellen (16x16 m) verfeinert, um Fließwege nachvollziehen zu können. Die Übergänge zwischen dem untersuchten Gebiet und Siedlungsbereich wird mit Zellen der Größe 8x8 m berechnet, damit Fehler durch zu große Größenunterschiede vermindert werden.

Mit Hilfe der vektorbasierten Informationen können Randbedingungen in das Modell integriert werden, wie beispielsweise der Abfluss, der in das Modell ein- oder austritt. Da das Modell jedoch bereits deutlich größer ist als das untersuchte Gebiet, werden dadurch genügend Einflüsse von außen, wie beispielsweise die Fließwege in Richtung Untersuchungsgebiet, mit einberechnet. Daher werden für das Modell keine weiteren Randbedingungen mehr hinzugefügt und das Wasser fließt am Rand des Modells entlang in die tiefsten Geländebenen.

5.4 Maßnahmenempfehlung

Das zweite 3Di-Modell beinhaltet neben den zuvor beschriebenen Bestandteilen zusätzlich Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung, sodass diese im Vergleich der jeweiligen Ergebnisse auf ihre Wirksamkeit geprüft werden können. Die

Maßnahmenempfehlung für die Gebäudegrundstücke erfolgt nach der Gefährdungskategorisierung in Abbildung 4. Für die Gebäudegrundstücke A und E wird aufgrund des hohen Versiegelungsgrads vor allem die Begrünung auf der Fläche empfohlen. Bei Gebäude E ist aufgrund der abschüssigen Straße und Hofeinfahrt zudem eine Nutzung von Speicherbecken sinnvoll. Die Gebäudegrundstücke B, C und D sollten aufgrund der Hanglage mit Speicherbecken oder der Rückhaltung auf der Fläche sowie Mulden versorgt werden.

Zu den untersuchten Maßnahmen im Modell gehören die Begrünungen von Flächen durch Entsiegelungen sowie Retentions-/Versickerungsmulden und Zisternen als Speicherbecken. Wo welche Maßnahmen untersucht werden, lässt sich der Abbildung 9 entnehmen. Die Entsiegelung von Flächen durch das Einsetzen von Rasengittersteinen erfolgt auf den Hofflächen der Gebäude A und E. Indem die Oberflächenrauheit von 0,017 auf 0,022 und die Infiltration von 0 mm/d auf 302,4 mm/d erhöht wird kann eine Entsiegelung modelliert werden [57]. In den Gärten der Gebäude B, C und D werden jeweils eine Mulde, mit einer durchschnittlichen Tiefe von 0,5 m und 15 m Länge, an die Grundstücksgrenzen gesetzt, da hier Geländestufen von etwa 1 m vorliegen. Durch die Geländestufen kommt es zu einem erhöhten Abfluss zwischen den Grundstücken, sodass die Grundstücke mit sinkender Geländehöhe von höheren Wasseransammlungen betroffen sind. Die Mulden sollen das (Stark-)Regenwasser auffangen Grundstückübergängen auffangen. Die Mulden werden hinzugefügt, indem die Geländehöhen des DGMS mittels des *QGIS*-Plugins *Serval* verändert werden. Bei beiden Maßnahmen (Entsiegelung und Mulden) entstehen neue TIFF-Dateien, welche in den einfachen Infiltrations- und globalen Einstellungen mit dem neuen Modell verknüpft sind. Zisternen werden neben der Entsiegelung auf Gebäudegrundstück E und der Mulde auf Gebäudegrundstück B aufgrund des aus Abbildung 6 zu erwartenden hohen Wasseraufkommens eingesetzt. Die Zisternen werden als vektorbasierte 1D-Elemente eingefügt. Da *3Di* keine Zisternen im System integriert hat, werden diese für die Untersuchung als Schächte eingegeben. Die Schächte besitzen mit einer Tiefe von 5 m und Grundfläche von 2 m² ein Fassungsvermögen von jeweils 10 m³ und nehmen das Wasser punktuell an den gesetzten Stellen auf. Damit werden drei verschiedene Maßnahmen untersucht, um diese je nach Standort und Kombination auf ihre Wirksamkeit zu prüfen.

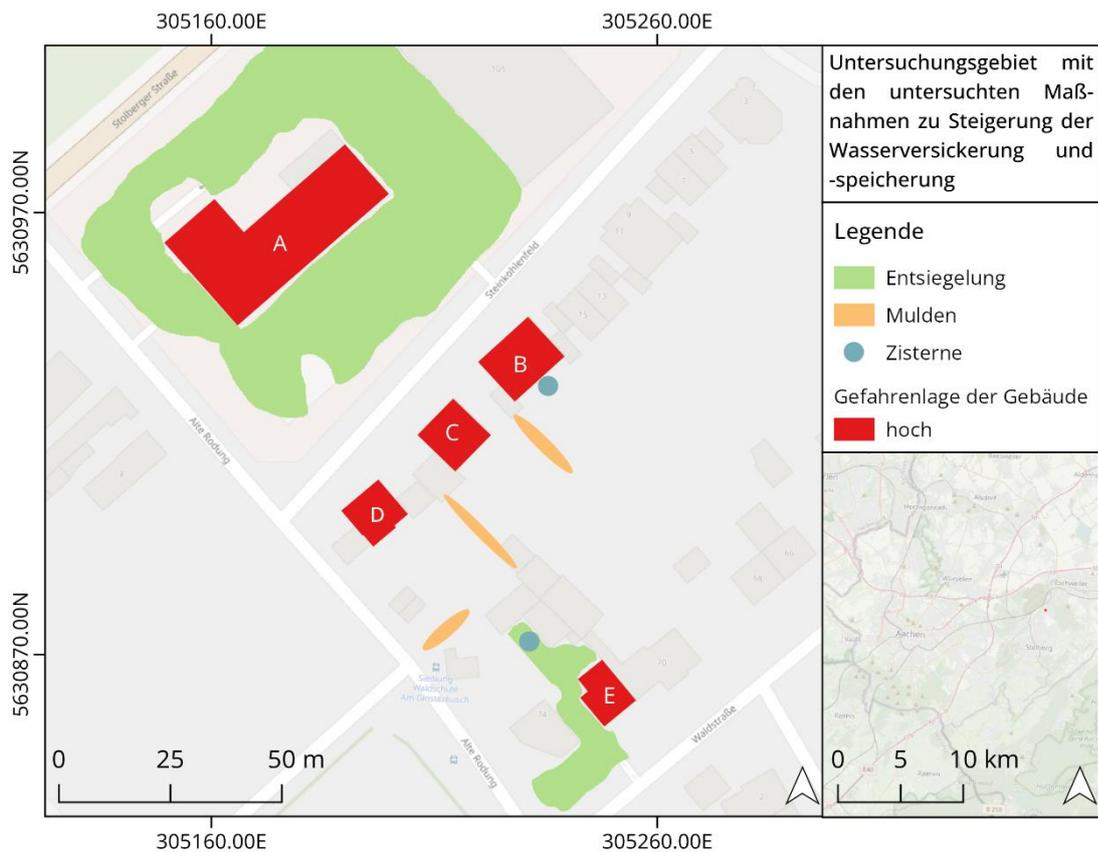


Abbildung 9: Untersuchungsgebiet mit den untersuchten Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung (Quelle: eigene Darstellung)

5.5 Simulation

Nach fehlerfreier Erstellung der *3Di*-Modelle folgen anschließend die Simulationen. Über den Browser können die Simulation live verfolgt werden und über das Interface werden die Ergebnisse nach Vollendung der Simulation heruntergeladen. Um eine Simulation zu starten benötigt *3Di* Informationen über das Ereignis, welches simuliert werden soll. Für diese Arbeit wird ein konstanter Starkregenfall gewählt, dessen Werte dem KOSTRA-Atlas⁷ der Region entnommen wurden. Um einen Vergleich zu den zuvor genannten Starkregenhinweiskarten zu ziehen, wird ein 100-jähriges Ereignis gewählt, welches die Basis der Starkregenhinweiskarten ist. Für Eschweiler sind 41,3 mm/h Regenwasser für ein einstündig anhaltendes Ereignis vorhergesagt. Für das erste Modell wird mit einem konstanten Regenfall des 100-jährigen Ereignisses eine Simulation gestartet. Mit dem zweiten Modell werden mehrere Simulationen erzeugt, um mehrere Variationen und Kombinationen an

⁷ <https://www.openko.de/kostra-dwd-2020-rasterfeld-nr-143091/>

Maßnahmen zu erhalten. Dazu zählt die Entsiegelung, das Hinzufügen der Retentionsmulden und Zisternen an verschiedenen Stellen sowie die Kombination aller Maßnahmen. Demnach wird ein Szenario vor Durchführung der Maßnahmen und insgesamt vier Szenarien nach Durchführung der Maßnahmen simuliert.

6. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen die Strömungsprozesse während des und nach dem einstündigen Starkregenereignisses von 41,3 mm/d im Untersuchungsgebiet. Die Gefahrenlage der Gebäude(-grundstücke) zeigt eine Veränderung, nachdem Maßnahmen implementiert wurden. Die Gefahrenlage wird durch ober- und unterirdische Strömungsprozesse beeinflusst und unterscheidet sich nach Fortschritt der Zeit und umgesetzten Maßnahmenzenarien.

6.1 Gefahrenlage vor durchgeführten Maßnahmen

Die Gefahrenlage der Gebäude(-grundstücke) ohne durchgeführte Maßnahmen wird durch das Fließverhalten, die Wasserstände am Gebäude und auf dem Grundstück und die Infiltration im untersuchten Gebiet während des Starkregenereignisses beeinflusst. Die entwickelte Bewertungsmethodik stuft alle Gebäude als hochgefährdet ein.

Im Untersuchungsgebiet können nach einem einstündigen 100-jährigen Starkregenereignis mit 41,3 mm/h unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten festgestellt werden. Abbildung 10 zeigt die Siedlung Waldschule in drei Teilansichten. Auf der linken Seite sind oben die Umgebung der Siedlung und unten das untersuchte Gebiet dargestellt. Die rechte Kartenseite zeigt eine Detailansicht des Gebäudes E im Südosten sowie die Gärten von Gebäude B und C im Nordwesten. Aus dem Waldgebiet im Südosten und Osten fließt das Wasser mit einer größtenteils sehr langsamen Fließgeschwindigkeit in die Siedlung. Das Wasser bewegt sich anschließend auf den Straßen der Siedlung von Südosten nach Nordwesten. In der Karte unten rechts ist zu sehen, dass das Wasser vor allem entlang der Straßen mit einer Geschwindigkeit von über 0,5 m/s fließt, was damit zu erklären ist, dass das Wasser dort nicht versickert und die Rauheit der Oberfläche sehr gering ist, sodass das Wasser keinen Behinderungen ausgesetzt ist. Aber auch zwischen den hoch gefährdeten Gebäuden fließt das Wasser mit Geschwindigkeiten von über 0,5 m/s, wie in der Detailkarte rechts an Gebäude E zu erkennen. Vor allem in den besiedelten Bereichen muss mit einer hohen Fließgeschwindigkeit gerechnet werden.

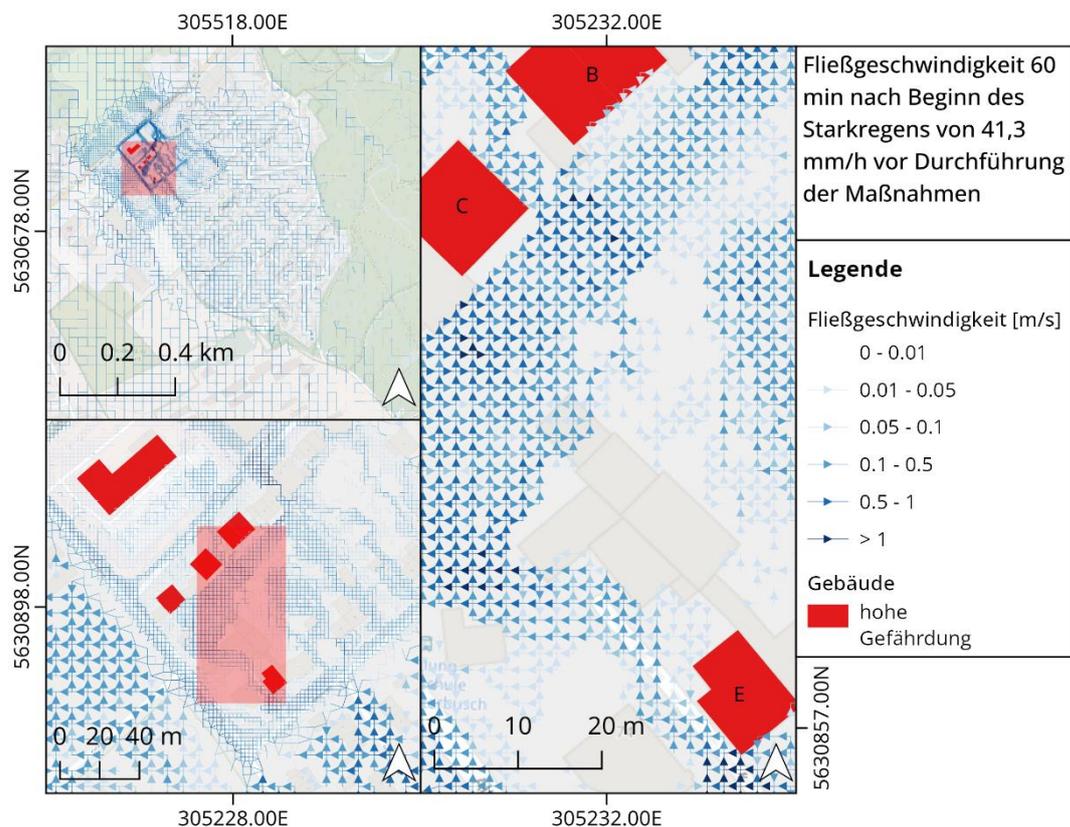


Abbildung 10: Fließgeschwindigkeit 60 min nach Beginn des Starkregens von 41,3 mm/h vor Durchführung der Maßnahmen (Quelle: eigene Darstellung)

Die Wasserstände an den untersuchten Gebäuden und deren Grundstücken unterscheiden sich je nach Dauer des Starkregenereignisses. Die Abbildung 11 zeigt die Wasserstände auf den hoch gefährdeten Gebäudegrundstücken nach 15, 30, 60 und 90 min. Erkennbar ist, dass die Wasserstände insbesondere im Nordwesten später ansteigen als im Südosten des dargestellten Bereichs. Das Wasser, welches von der Straße im Südosten kommt, sammelt sich bereits nach 15 min auf der Hoffläche von Gebäude E und steigt im weiteren Verlauf vereinzelt auf über 2 m, aber mindestens auf über 0,5 m. Nach 30 min ist eine Erhöhung des Wasserstands in den Gärten der Gebäude B bis D festzustellen. Auf Gebäudegrundstück B steigt das Wasser auf bis zu 1m, während es bei den Gebäude(-grundstücken) C und D die 0,5 m nicht überschreitet. Im Nordwesten des untersuchten Bereichs ist auf der Hoffläche des Gebäudes A nach 30 min eine leichte Anstauung des Wassers zu erkennen. 30 min nachdem das Starkregenereignis beendet ist, sind viele der unter 0,5 m liegenden Wasseransammlungen verschwunden. Dort wo der Wasserstand jedoch während des Ereignisses bei über 0,5 m lag, ist auch 30 min nach Ende des Regens eine Wasseransammlung zu erkennen. Davon betroffen sind die Gebäude(-grundstücke) A und B mit einem Wasserstand von bis zu 0,5 m, sowie die Hoffläche von Gebäude E mit

mindestens 0,5 m und vereinzelt über 2 m. Im gesamten Gebiet kommt es zu einer Steigerung der Wasserstände während des Ereignisses mit fortschreitender Zeit und einen Rücklauf nach Ende des Starkregens.

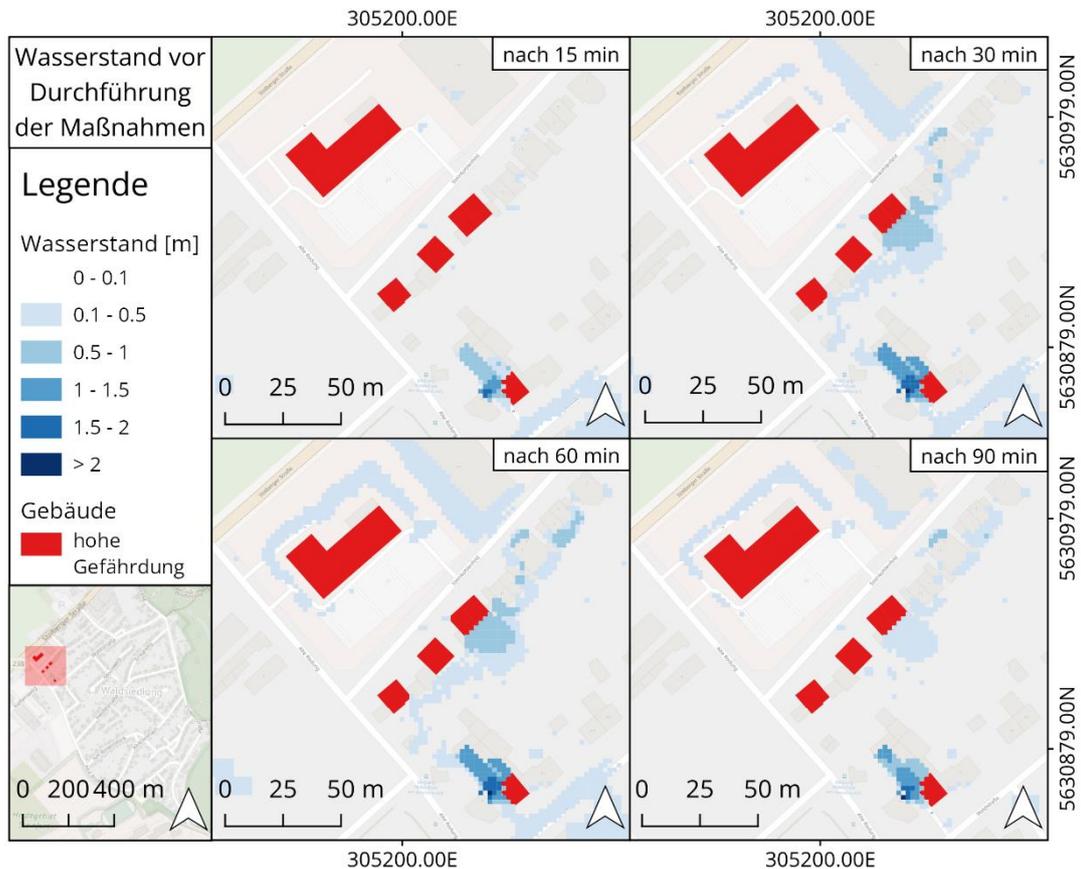


Abbildung 11: Wasserstand vor Durchführung der Maßnahmen im untersuchten Gebiet nach 15, 30, 60 und 90 min (Quelle: eigene Darstellung)

Neben dem oberflächlichen Verhalten des Wassers ergeben sich auch Daten zum unterirdischen Verhalten, der Infiltration in den Boden. Die Gesamtinfiltration im Bereich der untersuchten Gebäudegrundstücke beträgt 405 m^3 während des gesamten Simulationszeitraums (siehe Abbildung 12). In Abbildung 12 ist neben der Infiltration auch die Menge an Wasser, die oberflächlich in das untersuchte Gebiet zu- und abfließt sowie eine insgesamt gefallene Regenmenge von über 941 m^3 zu erkennen. Der Abfluss aus dem Gebiet ist mit 5655 m^3 insgesamt 447 m^3 größer als der Zufluss in das Gebiet.

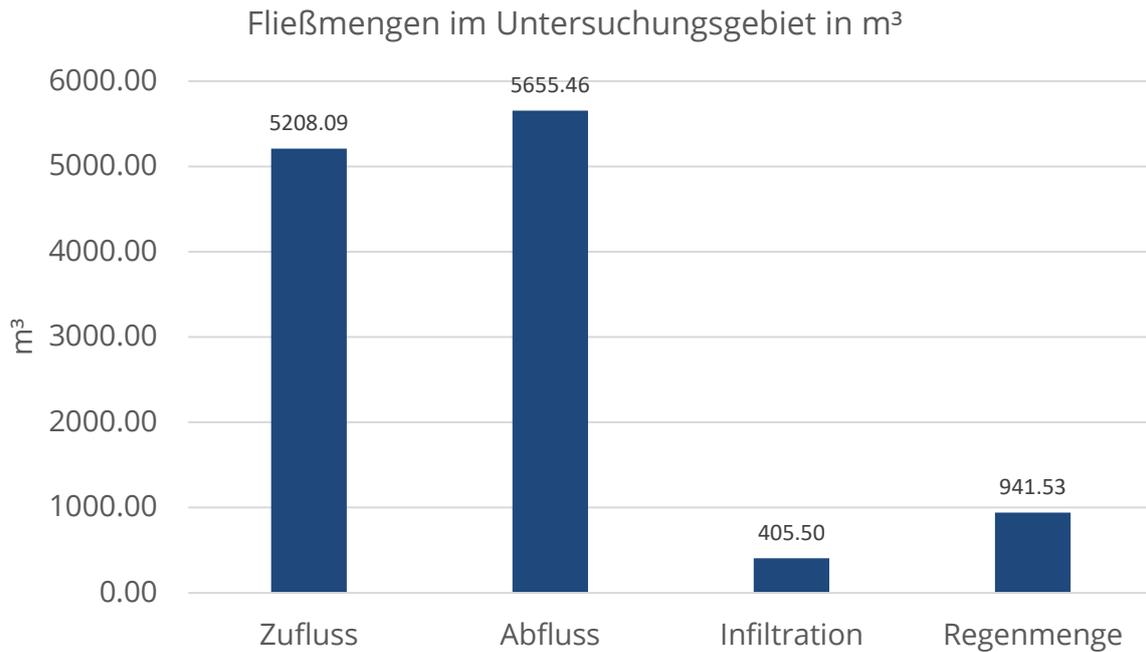


Abbildung 12: Fließmengen vor Durchführung der Maßnahmen im untersuchten Gebiet in m³ (Quelle: eigene Darstellung)

Abbildung 13 zeigt das zeitliche Fließ- und Infiltrationsverhalten im Gebiet während und nach dem Ereignis. Sowohl der Zufluss als auch der Abfluss, in dunkelblau dargestellt, steigen bis zum Ende des Starkregens auf jeweils knapp 2 m³/s an. Erkennbar ist auch, dass der Abfluss erst nach etwa 30 min größer wird als der Zufluss. Nach Ende des Starkregens nehmen sowohl Zufluss als auch Abfluss deutlich ab, bis sie nach 90 min nahe 0 m³/s sind. Die Infiltration liegt während des gesamten Zeitraums des Starkregens bei konstant knapp 0,1 m³/s. Nach 60 min nimmt sie ab und beträgt nach 90 min 0,02 m³/s. Des Weiteren zeigt sich, dass eine Infiltration auf den asphaltierten Flächen der Gebäudegrundstücke A und E nicht stattfindet (siehe Anhang A). Auf den Gebäudegrundstücken B, C und D dagegen ist eine leichte Infiltration durch die Rasenfläche zu erkennen (siehe Anhang A). Sichtbar wird, dass das unterirdische Fließverhalten der Infiltration im Vergleich zum oberflächlichen Fließverhalten während der gesamten Zeit deutlich geringer ist.

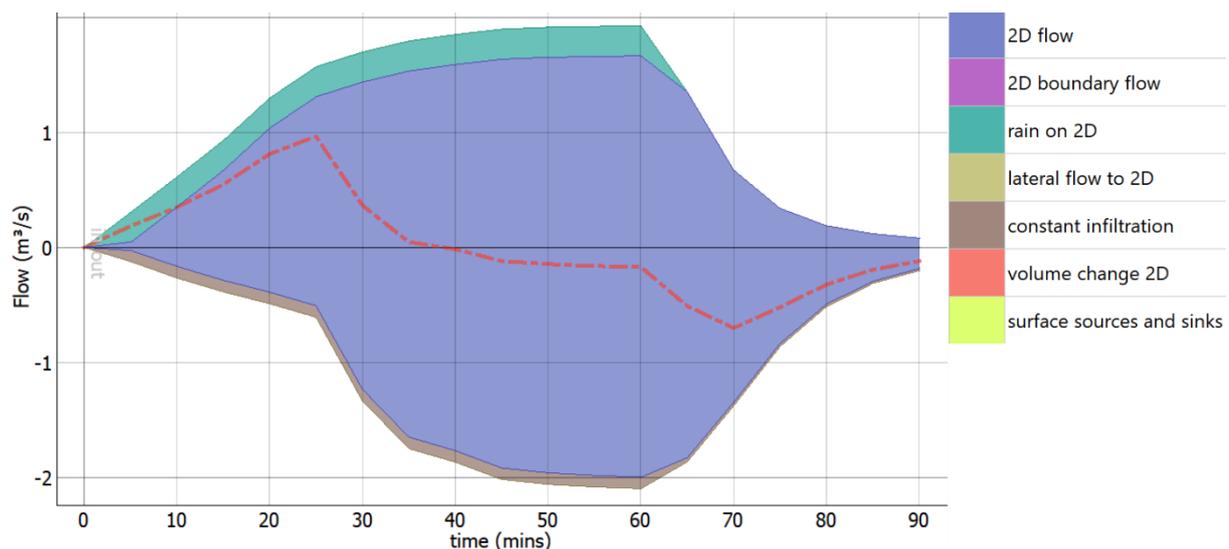


Abbildung 13: Wasserverhalten im untersuchten Gebiet vor Durchführung der Maßnahmen (Quelle: 3Di Ausgabe der Simulation)

6.2 Gefahrenlage nach durchgeführten Maßnahmen

Nachdem Maßnahmen umgesetzt wurden, zeigen das Fließverhalten, die Wasserstände und die Infiltration für jede Maßnahme Änderungen zur Untersuchung der Gefahrenlage ohne Maßnahmen. Die Entsiegelung und der Einsatz von Mulden und Zisternen werden zum einen als Maßnahmen für die Gebäude(-grundstücke) einzeln, und zum anderen in Kombination eingesetzt. Daraus ergeben sich jeweils neue Gefährdungspotenziale durch die Bewertungsmethodik.

Für das Fließverhalten im Untersuchungsgebiet nach einem einstündigen 100-jährigen Starkregenereignis mit 41,3 mm/h können nach Durchführung aller Maßnahmen unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten im untersuchten Gebiet festgestellt werden. Abbildung 14 zeigt die Siedlung Waldschule, und ist wie bereits in Abbildung 10 in drei Teilan-sichten dargestellt. Das Fließverhalten nach 60 min Starkregen zeigt sich durch Haupt-fließwege auf den Straßen der Siedlung (siehe oben links). Unten links sind Fließwege auf den Gebäudegrundstücken A bis E von Südosten nach Nordwesten zu erkennen. In der Detailansicht sind schnelle Geschwindigkeiten von über 1 m/s vor allem in Straßennähe der Hoffläche von Gebäude D, sowie an den Übergängen der einzelnen Grundstücke von Gebäude B, C und D erkennbar. Besonders an den Stellen, an denen die Mulden eingesetzt wurden, ergeben sich schnelle Fließgeschwindigkeiten von über 1 m/s. Auf den Hof-

flächen der Gebäude A und E sowie im Garten des Gebäudes B dagegen liegen die Fließgeschwindigkeiten an vielen Stellen unter 0,1 m/s. Insbesondere in den dicht besiedelten Bereichen sowie an den angebrachten Mulden ergeben sich demnach höhere Fließgeschwindigkeiten.

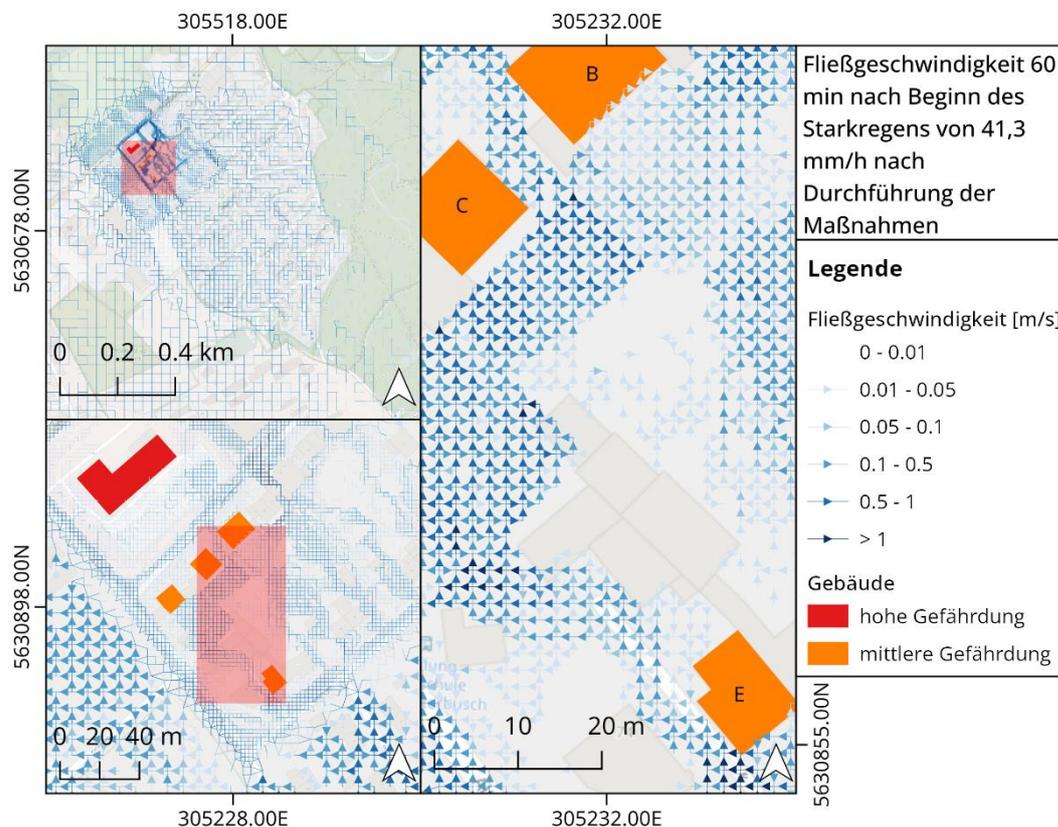


Abbildung 14: Fließgeschwindigkeit 60 min nach Beginn des Starkregens von 41,3 mm/h nach Durchführung aller untersuchten Maßnahmen (Quelle: eigene Darstellung)

Die Wasserstände während des einstündigen Starkregens nach Durchführung der einzelnen Maßnahmen variieren je nach zeitlichem Fortschritt. Abbildung 14 zeigt die Wasserstände im untersuchten Gebiet während der vier simulierten Szenarien zu den Zeitpunkten 15, 30 und 90 min nach Beginn des Ereignisses. Zudem sind die Unterschiede der der Gefährdungsbewertung an den Gebäuden ersichtlich. Nach Entsigelung der Hofflächen der Gebäude A und E sind diese weiterhin hochgefährdet. Der Wasserstand steigt auf rund 80 % der Hoffläche von Gebäude E nach 15 min auf bis zu 1 m und auf 20 % auf über 1,5 oder 2 m. Nach 30 min steigt der Wasserstand auf den 80 % über 1 m. 30 min nach Ende des Regenereignisses sinkt der Wasserstand an auf knapp der Hälfte der Fläche wieder auf unter 1 m. Die Grundstücksfläche des Gebäudes A ist bis nach 30 min nur vereinzelt an drei kleinen Stellen von Überflutungen über 0,1 m betroffen. Nach ist knapp 10 % der

Hofffläche von Überflutungen von bis zu 0,5 m betroffen. Durch Einsetzen der Mulden in den Gärten der Gebäude B, C und D verändert sich durch die Bewertungsmethodik die Gefährdung dieser Gebäude auf mittel. Nach 30 min ist eine Füllung der Mulden zu erkennen, welche bis nach Ende des Ereignisses bestehen bleibt. Auf dem Grundstück des Gebäudes D kommt es nach 30 min und auch nach 90 min zu keinen Überflutungen über 0,1 m. Gut die Hälfte des Gartens des Gebäudes B ist nach 30 min von Überflutungen von bis zu 1 m und weiteren von unter 0,5 m betroffen. Nach dem Ereignis liegen auf rund 75 % des Gartens Wasserstände zwischen 10 und 50 cm vor. Gebäude(-grundstück) C ist während des Ereignisses von Überflutungen bis maximal 0,5 m betroffen, ist aber nach 90 min frei von Anstauungen außerhalb der Mulde. Die Einbringung der Zisternen auf den Gebäudegrundstücken B und E, verringert nur die Gefährdung des Gebäudes B, weil hier eine geringe Versiegelung besteht. Ähnlich wie das Verhalten der Wasserstände nach den Entsiegelungen in Abbildung 15 ist das Verhalten auch nach Einsetzen der zwei Zisternen. Die beiden Szenarien unterscheiden sich zu den Zeitpunkten 30 und 90 min nach Ereignis nur geringfügig. Nach 15 min ist dagegen an der Stelle der Zisterne ein geringerer Wasserstand von unter 0,5 m auf der Hofffläche von Gebäude E erkennbar. Es zeigt sich, dass sich die Ansammlung des Wassers sowohl am Gebäude(-grundstück) E verzögert und erst zu einem späteren Zeitpunkt einsetzt. Die Kombination aller Maßnahmen verringert die Gefährdung durch Dürre und Starkregen an jedem Gebäude außer auf dem Gebäudegrundstück A, da Wasserspeichermöglichkeiten ausbleiben. Bis nach 30 min ist in Abbildung 15 eine fehlende Anstauung an den Gebäude(-grundstücken) A und D ersichtlich. Dagegen sind die Gebäude(-grundstücke) B und C auf unter 1 m angestaut und die Mulden sind leicht gefüllt. Gebäude(-grundstück) E ist wie bei den anderen Szenarien auf über 1 m von Wasser und lediglich bis 15 min noch unter 1 m geflutet. Nach 90 min nimmt die Wasserhöhe auf dem Gebäudegrundstück A zu, bleibt aber unter 0,5 m. Die Wasserstände auf dem Grundstück B sinken auf unter 50 cm und verschwinden auf Grundstück C. Lediglich die Mulden sind weiterhin gefüllt. Gebäude D ist während des gesamten Ereignisses nur von einer Flutung der Mulde betroffen. Deutlich wird insgesamt, dass mit zeitlichem Fortschritt des Ereignisses die Wasserstände zunehmen und nach Ende des Starkregens wieder abnehmen. Sie werden vor allem durch die Entsiegelung und das Einsetzen von Zisternen vermindert und durch die Mulden örtlich verändert.

Wasserstand während eines einstündigen Starkregens von 41,3 mm/h nach Durchführung der Maßnahmen nach 15, 30 und 90 min

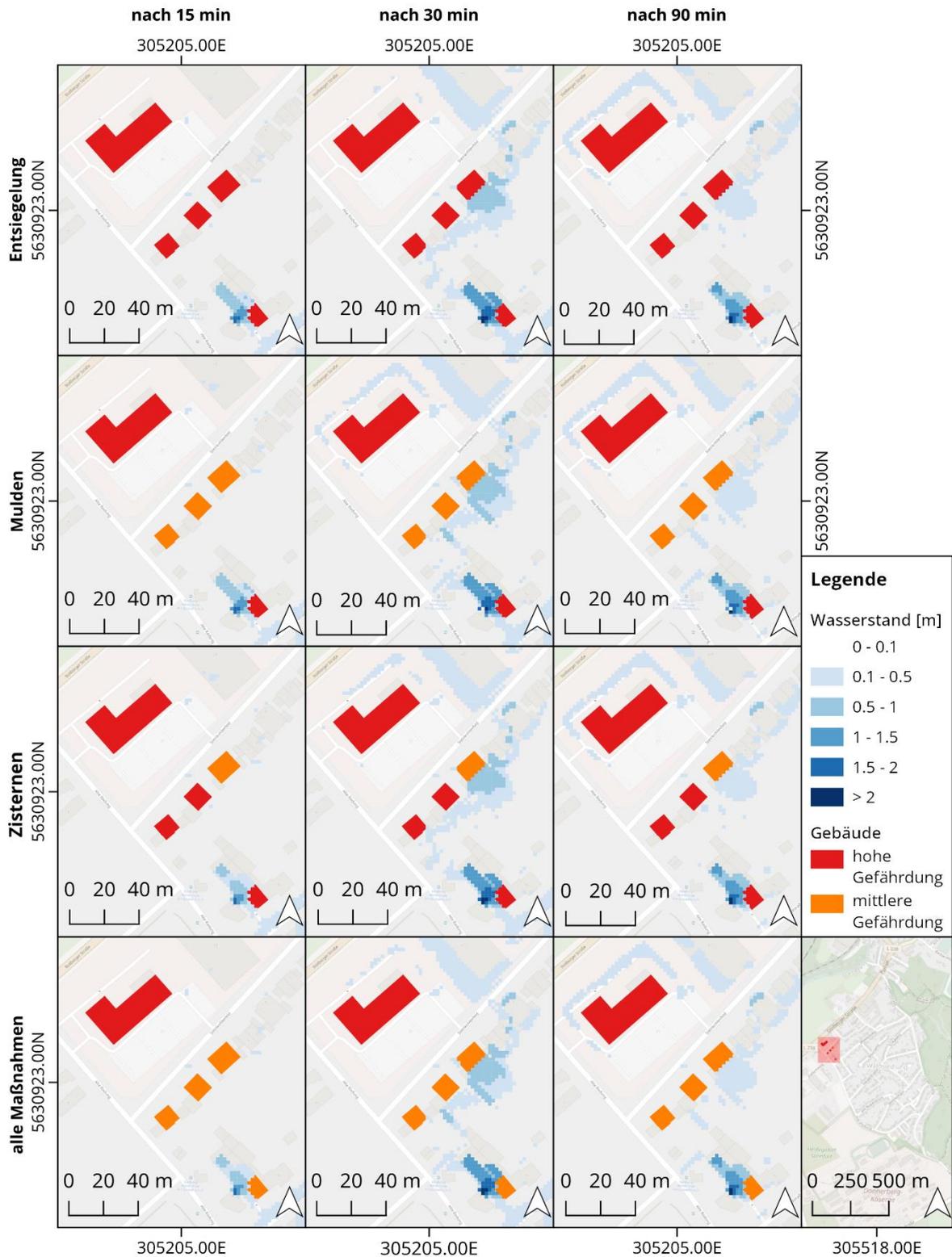


Abbildung 15: Wasserstand während eines einstündigen Starkregens von 41,3 mm/h nach Durchführung der Maßnahmen nach 30, 60 und 90 min (Quelle: eigene Darstellung)

Nach Durchführung der Maßnahmen zeigt sich neben der Infiltration auch das unterirdische Strömungsverhalten in die Zisternen. Die Infiltration nach Durchführung aller Maßnahmen zeigt in Abbildung 16 eine Gesamtmenge von 485 m³ im untersuchten Gebiet. Neben der Infiltration fließt eine Menge von 45 m³ aus dem Gebiet durch die Zisternen. Außerdem ist ein um 257 m³ höherer oberirdischer Abfluss als Zufluss im untersuchten Gebiet erkennbar. Dies ist auch der Abbildung 17 zu entnehmen, da der Zufluss (oben in dunkelblau) bereits kurz nach Beginn des Starkregens schnell steigt, während der Abfluss (unten in dunkelblau) erst nach etwa 30 min deutlich ansteigt. Durch Ersetzung der asphaltierten Flächen in Rasengitter nimmt die Infiltration zu. Die Infiltration in braun liegt während des Regens konstant bei 0,12 m³/s und sinkt nach Ende des Regens (nach 90 min) auf 0,03 m³/s. Der Zufluss in die Zisternen (siehe Abbildung 17 in gelb) beginnt etwa 10 min nach Beginn des Starkregens und endet 30 min nach Beginn. Nach 30 min sind beide Zisternen ausgelastet und nehmen kein weiteres Wasser auf. Die Infiltration und der Zufluss in Zisternen nehmen einen kleinen Teil des gesamten Strömungsverhaltens im Untersuchungsgebiet ein.

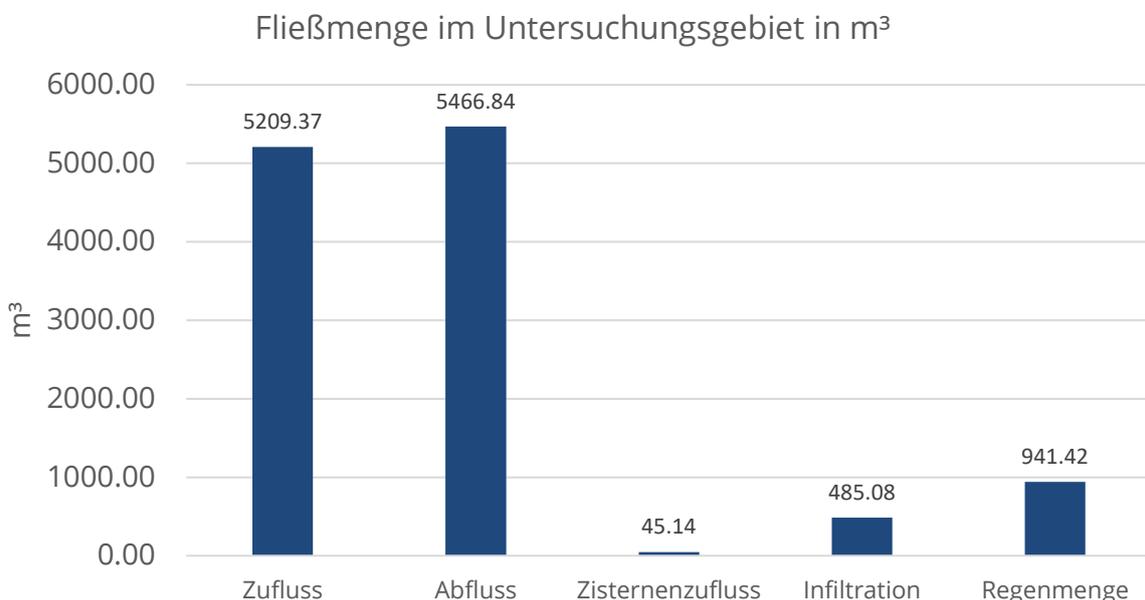


Abbildung 16: Fließmengen im Untersuchungsgebiet nach Durchführung aller Maßnahmen in m³ (Quelle: 3Di Ausgabe der Simulation)

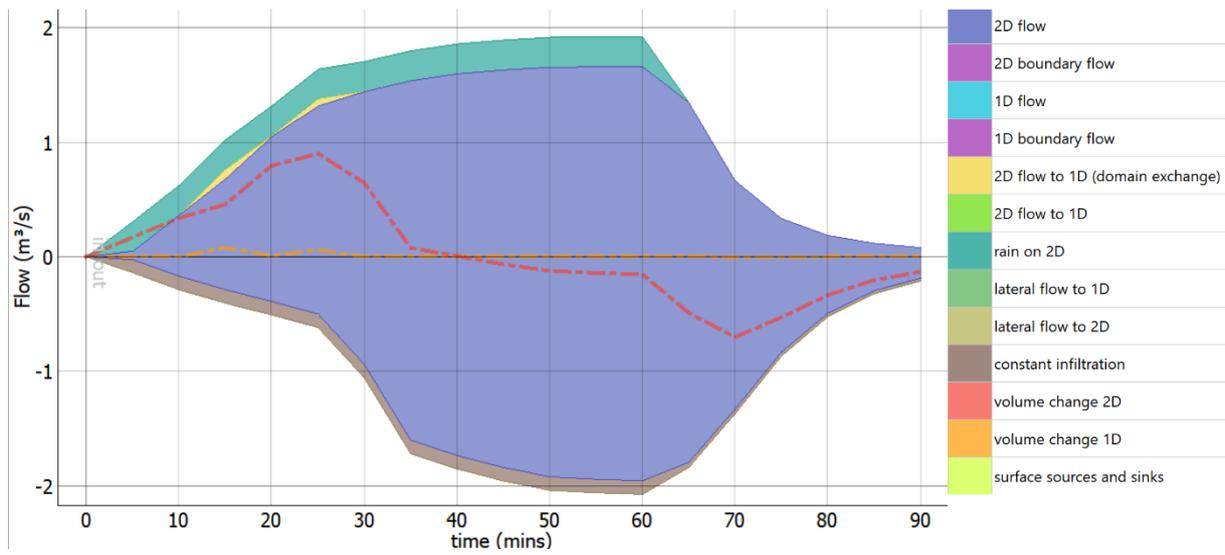


Abbildung 17: Wasserbalance im Untersuchten Gebiet nach Durchführung aller Maßnahmen (Quelle: eigene Darstellung)

7. Diskussion

Maßnahmen zur Klimaanpassung, insbesondere die Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung, an Gebäude(-grundstücken), sind zum flächendeckenden Schutz vor Dürre und Starkregen wirksam, das bestätigt auch der aktuelle wissenschaftliche Diskurs [10]. Eine Optimierung der Modellierung durch die Berücksichtigung weiterer Randbedingungen könnte weitere aussagekräftige Ergebnisse bringen, die zu einer effizienten Maßnahmenumsetzung beitragen. Um passende Maßnahmen empfehlen zu können, muss die Gefährdungslage der Gebäude(-grundstücke) gegenüber Dürre und Starkregen individuell bewertet werden. Hierbei kann die entwickelte Bewertungsmethodik einen wichtigen Beitrag leisten. Für den Einsatz in der Praxis und einer Integrierung in den *Hochwasser-Pass* muss diese jedoch im Feld getestet und gegebenenfalls weiterentwickelt werden.

7.1 Wirksamkeit der Maßnahmen

Die Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung haben Einfluss auf die Gefahrenlage von Gebäude(-grundstücken) durch Dürre. Der Vergleich der Simulationsergebnisse vor und nach durchgeführten Maßnahmen zeigt eine Steigerung der Wasserversickerung durch die Entsiegelung der asphaltierten Flächen. Im untersuchten Gebiet werden nach der Entsiegelung insgesamt 79 m³ mehr Wasser in den Boden infiltriert. Da dieser Unterschied nur sehr gering ist und vor allem die obere Bodenschicht betrifft, wird er einen eher geringen Einfluss auf die Bodenfeuchte oder den Grundwasserpegel in dem Gebiet haben. Einen flächendeckenden Einfluss auf die Wasserversickerung gegen Dürre wird die Entsiegelung von privaten Grundstücksflächen daher nicht bringen. Die Wasserspeicherung kann dagegen durch den Einsatz von Mulden und Zisternen erfolgen. Beide Maßnahmen zeigen in den ersten Minuten der Simulationsergebnisse eine Aufnahme des Regenwassers auf den privaten Grundstücken. Zudem beeinflussen Mulden die Fließwege auf den Gebäudegrundstücken, sodass auch schnell fließendes Wasser, welches nicht versickert, durch die Mulden aufgefangen werden kann. Das aufgenommene Wasser kann durch die Mulden verzögert in den Boden versickern und durch die Zisternen als Brauchwasser genutzt werden. Eine länger andauernde Simulation wäre von Interesse, um die Dauer des Verbleibs des gespeicherten Wassers nach einem Starkregen festzustellen und so die Möglichkeit einer Nutzung des Wassers während einer

Dürre zu untersuchen. Eine Kombination von Entsiegelungen, Mulden und Zisternen müsste für einen größeren Effekt auf die Gefahrenlage durch Dürren von einer großen Anzahl von Gebäudeeigentümer:innen (z.B. in ganzen Quartieren) umgesetzt werden. Die dadurch entstehenden Auswirkungen könnten zusätzlich durch die Maßnahmenumsetzung zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung auf kommunaler Ebene unterstützt werden.

Der Einfluss von Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung auf die Gefahrenlage durch Starkregen zeigt sich in den Simulationsergebnissen. Die unterschiedlichen Maßnahmen haben je nach zeitlichem Fortschritt Auswirkungen auf die Wasserstände und Fließwege. Die Entsiegelungen lassen durch die steigende Versickerung insbesondere auf größeren Flächen (siehe Gebäudegrundstück A) die Überflutungsflächen an den Gebäuden insbesondere zu Beginn des Ereignisses (nahezu) verschwinden. Auch die Zisternen reduzieren, solange sie nicht komplett gefüllt sind, den Wasseranstieg auf Gebäudegrundstücken um teilweise 50 cm in den ersten 15 min eines Starkregens. Hier zeigt sich, dass Zisternen vor allem für kurze und weniger intensive Starkregen hilfreich sein können, aber in jedem Fall ein großes Volumen benötigen, um Einfluss auf Wasserstände zu haben. Dabei wird die Annahme vorausgesetzt, dass die Zisternen vor Eintritt des Ereignisses nahezu leer sind. Der Einsatz von Mulden beeinflusst die Fließwege des Wassers, sodass es, wie bei Gebäude(-grundstück) D, zu keinen Überflutungen mehr kommt. Im Beispiel von Gebäude D sind auch die eingesetzten Mulden der Nachbargrundstücke dafür verantwortlich, dass sich die Gefahrenlage durch Starkregen mindert. Das zeigt die Bedeutung einer gemeinschaftlichen Maßnahmenumsetzung auf flächendeckenderer Ebene. Zudem zeigt sich, dass die Maßnahmen für langanhaltende und intensive Starkregenereignisse nicht ausreichen, um sich vor diesen zu schützen. Zur Reduzierung der Gefahrenlage durch Starkregen sollten Gebäudeeigentümer:innen zusätzlich zu den Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung demnach immer auch Objektschutzmaßnahmen implementieren. Wie schon bei der Vorsorge gegen Dürre sollten die Kommunen in die Pflicht genommen werden, ergänzende Maßnahmen umzusetzen.

Die Menge an Wasser, die auf einem Grundstück durch die einzelnen Maßnahmen versickert und gespeichert wird, ist durch das zu geringe Volumen nicht ausreichend für eine starke Reduktion der Wasserstände während eines Starkregens. Trotzdem ist die Umsetzung der Maßnahmen sinnvoll, denn zum einen trägt die Wasserspeicherung zu einer Entlastung des Kanalnetzes bei. Zum anderen kann das zurückgehaltene Wasser für eine Regenwasserbewirtschaftung der Gebäude(-grundstücke) genutzt werden. Daher ermöglichen die Maßnahmen die Wasserspeicherung, sodass das Wasser z.B. für die Gartenbewässerung von Grundstücken während einer Dürre eingesetzt werden kann. Abschließend kann demnach festgehalten werden, dass die Wasserspeicherung als Klimaanpassungsmaßnahme das Wasser während eines Starkregens zurückhält, was während einer Dürreperiode genutzt werden kann.

7.2 Modellierungsreflektion

Die durchgeführte Modellierung zeigt Übereinstimmungen mit öffentlichen Daten, aber auch Ungenauigkeiten durch das Vorgehen und nicht berücksichtigte Komponenten. Um die Simulationsergebnisse zu validieren, können diese mit den Starkregenhinweiskarten des LANUV abgeglichen werden. Die Gefahrenlage im Untersuchungsgebiet ohne durchgeführte Maßnahmen weist eine große Übereinstimmung mit den Wasserständen und den Überflutungsbereichen in den herangezogenen Karten auf. Ungenauigkeiten in der Modellierung können auf den Umgang mit Starkregenwasser in Bezug auf die Gebäude zurückgeführt werden. Aufgrund der ausgeschnittenen Gebäudepolygone im DGM nimmt das Modell die Flächen der Gebäude als nicht existent. Das heißt, an diesen Stellen tritt weder Wasser ein noch aus. Wasser, welches in der Realität auf Dachflächen trifft und anschließend über Regenrinnen in die Kanalisation geführt wird, wird vernachlässigt und ist nicht im Modell integriert. Darüber hinaus können fehlende Komponenten identifiziert werden, die in der Modellierung nicht berücksichtigt wurden und daher Auswirkungen auf die Ergebnisse haben. Dazu gehört, dass kein Kanalnetz integriert ist, was Einfluss auf die Fließwege und Wasserstände hat. Daher muss von entstanden Ungenauigkeiten in Bezug auf Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten ausgegangen werden. Für eine vollumfängliche Analyse der Wirksamkeit der Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung wäre neben den drei untersuchten Maßnahmen zusätzlich die Untersuchung noch fehlender Maßnahmen, wie die Rückhaltung am Gebäude und Rigolen,

von Interesse. Durch die Integration weiterführender Komponenten könnte die Modellierung trotz Übereinstimmung mit den Starkregenhinweiskarten optimiert werden.

7.3 Evaluierung der Bewertungsmethodik

Die Evaluierung der Bewertungsmethodik zeigt einen Unterschied zwischen Dürre und Starkregen. Mit dem *Hochwasser-Pass* sowie den weiteren Gebäudebewertungstools existieren schon einige Konzepte zur Bewertung der Gefahrenlage durch Starkregen und die Forschung ist weit fortgeschritten. Anders ist es bei der Bewertung der Gefahrenlage durch Dürre. Für eine erste Einordnung der Gefahrenlage durch Dürre auf Gebäudeebene hilft die entwickelte Bewertungsmethodik. Besonders weil eine ähnliche Bewertung zur Gefahrenlage durch Dürre auf Gebäudeebene in der Literatur nicht zu finden ist; hier muss die Forschung noch weitergeführt werden. Bevor eine Anwendung der Bewertungsmethodik zur Gefahrenlage durch Dürre in die Praxis umgesetzt werden kann, sollte diese weiterentwickelt und im Feld erprobt und evaluiert werden. Die entwickelte Bewertungsmethodik kann als Grundlage dienen, um weitere Aspekte mit Einfluss auf Dürreauswirkungen zu integrieren. Dazu zählt zum Beispiel die Berücksichtigung der Bodensättigung. Der eigentliche Einsatz der Bewertungsmethodik ist für das Feld vorgesehen, weil sie genaue Informationen zu Bestand der Versiegelungen, Speichermöglichkeiten oder örtlichen Gegebenheiten benötigt. In einer Pilotprojektphase im Feld könnte eine flächendeckendere Einordnung der Gefahrenlage und Maßnahmenempfehlung zum Beispiel für eine gesamten Siedlung interessante Erkenntnisse bringen. Die Bewertungsmethodik sollte insbesondere in Bezug auf die Dürre im Feld weiter erforscht und ergänzt werden, um eine vollständige Bewertung der Gefahrenlage durch Dürre und Starkregen auf Gebäudeebene durchführen zu können.

7.4 Integration in den *Hochwasser-Pass*

Nach Evaluierung der Bewertungsmethodik inklusive Maßnahmenkatalog kann bewertet werden, wie diese als Grundlage für eine Integration in den *Hochwasser-Pass* genutzt werden kann. Bei der Entwicklung der Bewertungsmethodik und des Maßnahmenkatalogs wurde sich bereits an die Schemata im *Hochwasser-Pass* gehalten. Das macht eine mögliche Integration unkompliziert und effizient. Für die Bewertung der Gefahrenlage durch

Starkregen wären lediglich zwei weitere Bewertungspunkte in Bezug auf die Wasserversickerung und -speicherung hinzuzufügen. Eine Übernahme ist geeignet, da beide Bewertungspunkte (Versiegelung und Speichermöglichkeiten am Gebäude) einen Einfluss auf Auswirkungen durch Starkregen haben. Wie in Abschnitt 7.3 bereits beschrieben, erfordert die Bewertung der Gefahrenlage durch Dürre für eine Integration in den *Hochwasser-Pass* eine weiterführende Entwicklung und Erforschung. Nachdem diese erfolgt ist, sollte eine Eingliederung diskutiert werden, da Dürreperioden auch Gebäude- und Grundstückseigentümer:innen in Zukunft immer mehr betreffen werden und Maßnahmen helfen können. Daher ist auch das Hinzufügen zusätzlicher Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung in den Maßnahmenkatalog des *Hochwasser-Passes* sinnvoll. Die Maßnahmenempfehlung und Katalogerstellung nach Gefährdungspotenzial durch Dürre und Starkregen erfolgte bereits so, dass dem *Hochwasser-Pass* fehlende Maßnahmen unkompliziert hinzugefügt werden können. Die entwickelte Bewertungsmethodik inklusive Maßnahmenkatalog kann als Grundlage für eine Integration in den *Hochwasser-Pass* dienen, welche jedoch zuvor noch weiterentwickelt und -evaluiert werden sollte.

8. Fazit

Mit der Untersuchung privater Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung wird in der Arbeit ein aktuell bedeutsames Thema mit Bezug auf den Klimawandel und dadurch notwendige Anpassungen behandelt.

Die entwickelte Bewertungsmethodik und Analyse der Wirksamkeit der Maßnahmen kann als Basis dienen, um einen Beitrag zum wissenschaftlichen Stand zur Gefahrenvorsorge insbesondere gegen Dürre aber auch gegen Starkregen zu leisten. Sie können außerdem als Grundlage für eine Integration in den *Hochwasser-Pass* dienen, um Dürre in die Gefahrenbewertung aufzunehmen und die untersuchten Maßnahmen stärker einzubinden.

Die Analyse der Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung auf Gebäudeebene zeigt, dass ihre Umsetzung keine vollständige Gefahrenvorsorge gegen Starkregen bietet. Für einen umfassenden Schutz des Gebäudes müssen ergänzend immer zusätzliche Objektschutzmaßnahmen implementiert werden. Eine flächendeckendere Anwendung auf gemeinschaftlicher Ebene z.B. in ganzen Quartieren können einen größeren Effekt zum Schutz vor Dürre und Starkregen haben. Die Regenwasserrückhaltung ermöglicht Gebäudeeigentümer:innen die Nutzung des Wassers während einer und sind leisten demnach einen Beitrag zur Klimaanpassung.

Für weitere Untersuchungen sind insbesondere die Erweiterung der Bewertungsmethodik und der Modellierung sinnvoll. Die Weiterentwicklung und ergänzende Evaluierung der Bewertungsmethodik sollte mit einer Pilotprojektphase im Feld erfolgen. Außerdem können weiterführende Simulationen auf Gebäudeebene von Interesse für die Untersuchung der Wirksamkeit weiterer Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung von Interesse sein.

Zweidimensionale-hydrodynamische-numerische Modelle sind als Basis für die Analyse der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Steigerung der Wasserversickerung und -speicherung auf Gebäudeebene gut geeignet. Die Analyse zeigt, dass eine weitreichendere und flächendeckendere Maßnahmendurchführung über die Gebäudeebene hinaus zum Schutz vor Dürre und Starkregen notwendig ist.

Literaturverzeichnis

- [1] IPCC, Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. doi: 10.1017/9781009157896.
- [2] T. Meinert, A. Becker, P. Bissolli, J. Daßler, J. N. Breidenbach, und M. Ziese, „Ursachen und Folgen der Trockenheit in Deutschland und Europa ab Juni 2019“, Offenbach, 2019.
- [3] P. van Rùth, K. Schönthaler, S. von Andrian-Werburg, und M. Buth, „Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“, Dessau-Roßlau, Nov. 2019. Zugegriffen: 13. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/DL2387>
- [4] P. Bissolli u. a., „Trockenheit in Europa 2022“, Offenbach, Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://rcccm.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/duerre/20220706_trockenheit_europa_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=7
- [5] N. Hohndorf, „Dürre als Folge des Klimawandels“, Umweltbundesamt. Zugegriffen: 15. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/grundlagen-des-klimawandels/duerre-als-folge-des-klimawandels>
- [6] S. L. ARD-Wetterkompetenzzentrum, „Starkregen und Hagel: Wo am Donnerstag Unwetter drohen“, tagesschau.de. Zugegriffen: 26. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tagesschau.de/wissen/klima/unwetter-donnerstag-100.html>
- [7] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Hrsg., Leitfaden Starkregen: Objektschutz und bauliche Vorsorge: Bürgerbroschüre, 1. Auflage, Stand: November 2018. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2018.
- [8] BMWSB, „Hochwasserschutzfibel Objektschutz und bauliche Vorsorge“, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Berlin, 2022. Zugegriffen: 6. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bauen/hochwasserschutzfibel.pdf?__blob=publicationFile&v=1

- [9] K. Huth, A. Joeres, M. Donheiser, P. Thom, und L. Brosowsky, „Hitze, Dürre, Starkregen: So schlecht ist Deutschland vorbereitet“, correctiv.org. Zugriffen: 16. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://correctiv.org/aktuelles/klimawandel/2023/07/12/wasser-mangel-hitze-starkregen-duerre-deutschland-landkreise-unvorbereitet-extremwetter/>
- [10] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Starkregeneinflüsse auf die bauliche Infrastruktur, 2. Aufl. Bonn, 2022.
- [11] HochwasserKompetenzCentrum (HKC) e.V., „Hochwasser-Pass - Schutz für Haus und Leben“. Zugriffen: 16. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hochwasser-pass.com/>
- [12] Umweltbundesamt, „Böden als Wasserspeicher - Erhöhung und Sicherung der Infiltrationsleistung von Böden al ein Beitrag des Bodenschutzes zum vorbeugenden Hochwasserschutz“, S. 2016.
- [13] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, „Hochwasserschutz durch natürlichen Rückhalt“. Zugriffen: 9. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hochwasserinfo.bayern.de/hintergrundwissen/wie_geht_bayern_mit_hochwasser_um/natuerlicher_rueckhalt/index.htm
- [14] K. Fuchs, „Modellbasierte Ermittlung der Wirksamkeit von Schwammstadtansätzen auf die Reduzierung der Überflutung durch extreme Starkregen“, Master Thesis, Hannover : Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, 2021. doi: 10.15488/11125.
- [15] Prof. Dr. A. Thieken, „Hochwasserschäden an Privatgebäuden und mögliche Vorsorgemaßnahmen“, in KAHR KlimaAnpassung, Hochwasser und Resilienz, Potsdam-Golm, S. 2. [Online]. Verfügbar unter: <https://hochwasser-kahr.de>
- [16] S. Nadler, A. Jaeschke, A. Jentsch, T. Bittner, und C. Beierkuhnlein, „Auswirkungen von Extremereignissen auf die Biodiversität – eine Literaturanalyse“. 2011. [Online]. Verfügbar unter: https://www.biogeo.uni-bayreuth.de/biogeo/de/pub/pub/89202/Nadler_et_al_2010_BfN_Schriftenreihe_Auswirkungen_von_Extr.pdf
- [17] Deutscher Wetterdienst, „Dürre - Wetter- und Klimalexikon“. Zugriffen: 13. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=100578&lv3=603288>

- [18] A. Beste, „Das Problem mit dem Wasser ist ein Bodenproblem“, Stiftung Ökologie & Landbau, Bad Dürkheim, Allgemeine Presse and Fachartikel (nicht peer-reviewed) 4/2002, 2002. Zugegriffen: 8. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://orgprints.org/id/eprint/922/>
- [19] A. K. Mishra und V. P. Singh, „A review of drought concepts“, Journal of Hydrology, Bd. 391, Nr. 1, S. 216, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- [20] Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, „FAQ: Niedrigwasser und Hochwasser in den Bundeswasserstraßen“, Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt. Zugegriffen: 27. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gdws.wsv.bund.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/20230717_Niedrigwasser_FAQ.html;jsessionid=0636A536C8C16D29A8CC66E30A5716E5.live21323
- [21] J. Regner, „Möglichkeiten, Auswirkungen von Dürren auf die Landwirtschaft zu verringern“, Universität Augsburg, 2014.
- [22] Deutscher Wetterdienst, „Stadtklima - die städtische Wärmeinsel“. Zugegriffen: 27. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html
- [23] Deutscher Wetterdienst, „Starkregen“, Wetterlexikon. Zugegriffen: 12. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html>
- [24] M. Dr. Rauthe, G. Dr. Malitz, A. Dr. Gratzki, und A. Dr. Becker, „Forschungsfeld Naturgefahren - Starkniederschlag“, 2014, doi: 10.2312/GFZ.2014.005.
- [25] T. Junghänel u. a., „Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet ‚Lambert‘ vom 22. bis 23. Juni 2023“, Offenbach, 2023.
- [26] W. Dachroth, „Wasserhaltung, Entwässerung und Wasserversickerung“, in Handbuch der Baugeologie und Geotechnik, W. Dachroth, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2017, S. 291–315. doi: 10.1007/978-3-662-46886-9_6.
- [27] AQUA-Bautechnik, „Versickerungs-Handbuch“. 2007. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.aqua-ing.de>

- [28] H. Prof. Wiggering u. a., Flächenverbrauch einschränken – jetzt handeln. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2009. Zugegriffen: 9. Mai 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/flaechenverbrauch-einschraenken-jetzt-handeln>
- [29] G. Mann und T. Klinger, „Regenwasserbewirtschaftung mit Dachbegrünung - Rückhalt, Abflussverzögerung, Speicherung“, greenbuilding, 2015, [Online]. Verfügbar unter: www.greenbuilding-magazin.de
- [30] T. Hartmann und M. Scheibel, „Flood Label for buildings – a tool for more flood-resilient cities“, E3S Web Conf., Bd. 7, S. 13006, 2016, doi: 10.1051/e3sconf/20160713006.
- [31] M.-S. Attems, T. Thaler, K. A. W. Snel, P. Davids, T. Hartmann, und S. Fuchs, „The influence of tailored risk communication on individual adaptive behaviour“, International Journal of Disaster Risk Reduction, Bd. 49, S. 101618, Okt. 2020, doi: 10.1016/j.ijdr.2020.101618.
- [32] P. A. Witte, K. A. W. Snel, und S. C. M. Geertman, „Less is More? Evaluating Technical Aspects and User Experiences of Smart Flood Risk Assessment Tools“, Urban Planning, Bd. 6, Nr. 3, S. 283–294, Aug. 2021.
- [33] P. Davids, „Rethinking floodlabel: a situational approach to homeowner involvement in flood risk management“, Dissertation, Ghent University, 2021. Zugegriffen: 8. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/1854/LU-8718390>
- [34] Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, „Flood resilience: Information tool for Buildings“, FLOOD.Bi. Zugegriffen: 18. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/ida/?jsessionid=FE6C8CB8CC47BF9DC7E22E102A122063>
- [35] „Hochwasservorsorgeausweis - Hochwasser Eigenvorsorge“. Zugegriffen: 17. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bdz-hochwassereigenvorsorge.de/de/was-bieten-wir-an/hochwasservorsorgeausweis.html>
- [36] HochwasserKompetenzCentrum (HKC) e.V., „Hochwasser-Pass - Sachanlage“.
- [37] S. Kind und T. Jetzke, „Gebäudebegrünung zur Vorbeugung und Minderung von Klimafolgen“. Zugegriffen: 8. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000156298>

- [38] P. Leistner, A. Eitle, P. Krause, L. Meier, und H. Röseler, Klimaangepasste Gebäude und Liegenschaften: Empfehlungen für Planende, Architektinnen und Architekten sowie Eigentümerinnen und Eigentümer, 2., Überarbeitete Auflage. in Zukunft bauen: Forschung für die Praxis, no. Band 30. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2023.
- [39] Optigrün international AG, „Systeme zur Dachbegrünung“, Optigrün - Die Dachbegrüner. Zugegriffen: 12. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.optigruen.de/systemloesungen>
- [40] M. Brune, S. Bender, und M. Groth, „Gebäudebegrünung und Klimawandel - Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung“. Zugegriffen: 26. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2017/69300/>
- [41] Fachvereinigung Bauwerksbegrünung e.V (FBB), „Grüne Innovation Fassadenbegrünung“. BuGG, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-fachinfos/Fassadenbegrueung/FBB-Fassadenbegrueung.pdf>
- [42] Stadt Siegen, „Versickern statt Versiegeln - Information zur Bodenentsiegelung und Regenwasserversickerung“, Jan. 2006, [Online]. Verfügbar unter: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/bodenschutz/bodenschutz_bauen/pdf/Versickern_statt_Versiegeln_Stadt_Siegen.pdf
- [43] Hübner-Lee, „TTE® -- Flächen versiegelungsfrei und ökologisch befestigen“, Hübner-Lee. Zugegriffen: 3. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.huebner-lee.de/aussenanlagen-tte-system.html>
- [44] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, „Versickerungsverfahren“, Baufachliche Richtlinien Abwasser. Zugegriffen: 13. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfr-abwasser.de/html/Regenwasserbewirtschaftung.11.14.html>
- [45] IÖR ISBE, „Wohngebäude“, IÖR Informationssystem Gebaute Umwelt. Zugegriffen: 8. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://ioer-isbe.de/ressourcen/bauwerksdaten/wohngebaeude>

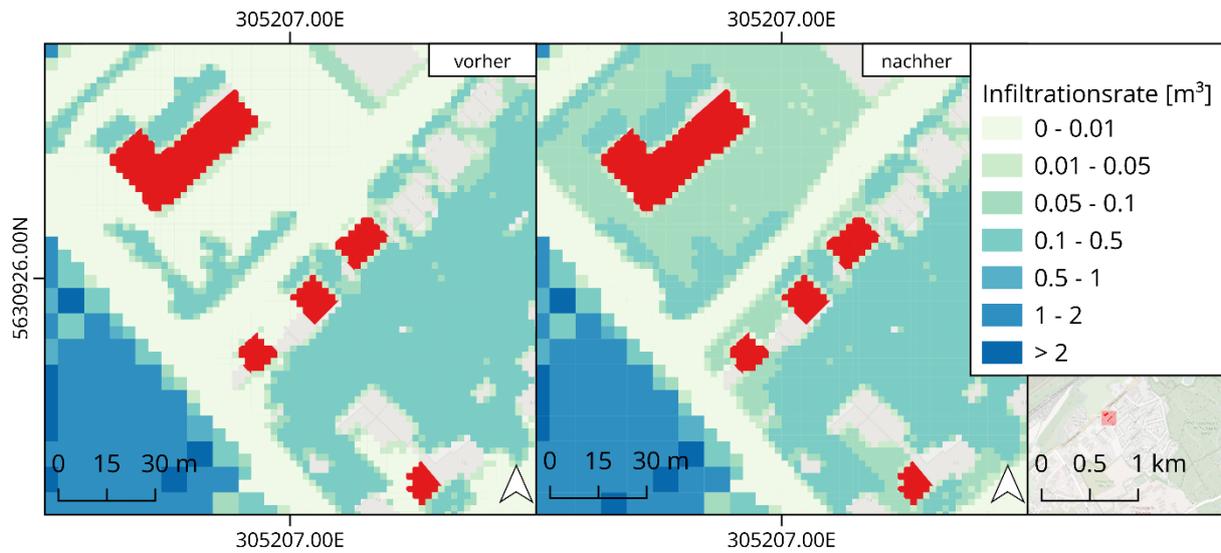
- [46] IÖR ISBE, „Nichtwohngebäude“, IÖR Informationssystem Gebaute Umwelt. Zugegriffen: 3. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://ioer-isbe.de/ressourcen/bauwerksdaten/nichtwohngebaeude>
- [47] LANUV, „Klimaatlas“, Klima.NRW.Plus. Zugegriffen: 18. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.klimaatlas.nrw.de/klima-nrw-pluskarte>
- [48] Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ, „Dürremonitor Deutschland“. Zugegriffen: 25. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>
- [49] Geodateninfrastruktur NRW, „GEOportal.NRW“. Zugegriffen: 25. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.geoportal.nrw/?activetab=portal>
- [50] „Google Earth“. Zugegriffen: 25. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://earth.google.com/web/>
- [51] QGIS, „QGIS - Das führende Open-Source-Desktop-GIS“. Zugegriffen: 15. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://qgis.org/de/site/about/index.html#>
- [52] 3Di, „Schematisation, Models & Simulations“, 3Di documentation. Zugegriffen: 17. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://docs.3di.live/h_schematisations_models_simulations.html
- [53] inisterium für Heimat, Kommunales, Bau und Digitalisierung des Landes Nordrhein-Westfalen, „Digitales Geländemodell NW Gitterweite 1m Open.NRW“, Open.NRW. Zugegriffen: 22. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://open.nrw/dataset/0c6796e5-9eca-4ae6-8b32-1fcc5ae5c481>
- [54] G. Bollrich, Technische Hydromechanik 1 Grundlagen, 8. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019. Zugegriffen: 17. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dbod.de/login?url=http://sdvdbodnodb.slub-dresden.de/boo/3042715.pdf>
- [55] Bezirksregierung Köln, „Landbedeckung NRW“, Bezirksregierung Köln. Zugegriffen: 22. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/luftbild-und-satellitenbildinformationen/aktuelle-luftbild-und-3>

- [56] M. Dipl.-Ing. Illgen, „Das Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen und seine urbanhydrologische Quantifizierung“, Technische Universität Kaiserslautern, 2009. Zugegriffen: 25. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter:
<https://kluedo.ub.rptu.de/frontdoor/index/index/docId/2080>
- [57] M. Illgen, „Überprüfung von Standard-Abflussbeiwerten durch Niederschlag-Abfluss-Simulation“, Diplomarbeit, Technische Universität Kaiserslautern, 2000. Zugegriffen: 25. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter:
<https://kluedo.ub.rptu.de/frontdoor/index/index/docId/1841>

Anhang

Anhang A

Infiltrationsrate in m^3 im Untersuchungsgebiet vor und nach Durchführung aller Maßnahmen



Digitaler Anhang

Der digitale Anhang des Abschlussberichts ist dem beigelegten USB-Stick zu entnehmen.
Die angelegte Ordnerstruktur ist im Folgenden dargestellt:

1. Digitale Version der Diplomarbeit

- a. Diplomarbeit_Hippel_2023.pdf
- b. Diplomarbeit_Hippel_2023.docx

2. 3Di-Modelle

- a. Dateiordner: Modell_1
- b. Dateiordner: Modell_2
- c. DA_Hippel_Antonia.qgz

3. Ergebnisse in Excel

- a. Fließmengen Untersuchungsgebiet.xlsx
- b. Bewertung der Gefahrenlage.xlsx

4. Datengrundlagen

- a. Landbedeckung_VOR.gpkg
- b. Landbedeckung_NACH.gpkg
- c. DGM.tiff