

Schriftenreihe Band 17 | 2026

wasser infrastruktur ressourcen



**Modelltechnische Untersuchungen
zum Effekt von dezentralen Regen-
wasserbewirtschaftungsanlagen für
die Starkregenvorsorge**

Jonas Neumann

RP

TU

Rheinland-Pfälzische
Technische Universität
Kaiserslautern
Landau

Modelltechnische Untersuchungen zum Effekt von dezentralen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen für die Starkregenvorsorge

Jonas Neumann

Kaiserslautern

2026

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen | Band 17

Herausgeber: Institut Wasser Infrastruktur Ressourcen

Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau
Paul-Ehrlich-Straße 14
67663 Kaiserslautern

Verfasser: Jonas Neumann

Verlag: Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau

Druck: Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau
Abteilung 5.6 Foto-Repro-Druck

D-386

© Institut Wasser Infrastruktur Ressourcen | Kaiserslautern 2026



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

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 2570-1460

ISBN 978-3-95974-260-3

Modelltechnische Untersuchungen zum Effekt von dezentralen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen für die Starkregenvorsorge

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

Vorgelegt von

M.Sc. Jonas Neumann

Dekan Prof. Dr.-Ing. Karsten Körkemeyer

Prüfungskommission

Vorsitzender Prof. Dr.-Ing. Wilko Manz

1. Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. Ulrich Dittmer

2. Berichterstatter Prof. Dr. Axel Bronstert

Datum der Prüfung 27.01.2026

Kaiserslautern 2026

(D 386)

Danksagung

An erster Stelle möchte ich meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Dittmer, meinen herzlichen Dank aussprechen. Seine stets wohlwollenden und konstruktiven fachlichen Anmerkungen und Ratschläge sowie seine offene Art haben mich während der gesamten Forschungsarbeit maßgeblich unterstützt. Besonders geschätzt habe ich auch die wertvollen Gespräche abseits des fachlichen Rahmens.

Bei Prof. Dr. Axel Bronstert bedanke ich mich ausdrücklich für die Annahme des Korreferats und das hilfreiche Feedback zu meiner Arbeit.

Ebenso gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Wilko Manz für die bereitwillige Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts Wasser – Infrastruktur – Ressourcen danke ich für den fachlichen und privaten Austausch. Meinen besonderen Dank spreche ich Dr.-Ing. Christian Scheid aus, der für mich stets ein offenes Ohr hatte und von dem ich viel lernen durfte. Bei Karim Sedki möchte ich mich für die Freundschaft und den inhaltlichen Austausch bedanken ebenso bei Jun.-Prof. Dr.-Ing. Carlo Morandi, mit dem ich noch zusätzlich die gemeinsamen Trainingseinheiten im UNIFIT verbinde.

Mein Dank gilt den ehemaligen Projektpartnern, besonders den Berliner Wasserbetrieben, die maßgebliche Grundlagendaten für diese Arbeit bereitgestellt haben.

Ich bedanke mich ganz herzlich bei meinem Vater Dr.-Ing. Rüdiger Neumann für die Unterstützung und bei meinen Brüdern Martin und Micha.

Zuletzt – und am allermeisten – bedanke ich mich bei meiner Frau Ivana. Ohne ihren Rückhalt wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Kurzfassung

Als Folge des Klimawandels ist mit einer Zunahme und Intensivierung von Starkregenereignissen zu rechnen, wobei besonders hochversiegelte Stadtgebiete durch Starkregen und den daraus resultierenden Überflutungen gefährdet sind. Konventionelle städtische Entwässerungssysteme sind nicht darauf ausgelegt, außergewöhnliche und extreme Starkregenereignisse überflutungsfrei abzuleiten. Dezentrale Regenwasserbewirtschaftungsanlagen (RWBA) können eine Lösungsmöglichkeit sein, die Resilienz bestehender Entwässerungssysteme gegenüber Starkregenereignissen zu verbessern. Diese Arbeit untersucht modellgestützt die Wirksamkeit verschiedener RWBA – Versickerungsanlagen, Gründächer, Zisternentypen und modifizierte Straßenbäume – in einem städtischen Untersuchungsgebiet. Mithilfe eines gekoppelten 1D/2D-Simulationsmodells, in dem sowohl das Kanalnetz als auch die Gebietsoberfläche berücksichtigt werden und das die SWMM-LID-Ansätze zur Modellierung der RWBA einbezieht, wird die Überflutungsreduzierung quantifiziert und die Leistungsfähigkeit der Anlagen im Quervergleich bewertet. Dabei werden unterschiedliche Implementierungsgrade, Niederschlagsverteilungen, Regendauern, die räumliche Anordnung der RWBA sowie die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Einzugsgebiete analysiert.

Der Leistungsvergleich der Anlagen zeigt, dass die auf $T = 5$ a dimensionierten Versickerungsanlagen auch bei einem einstündigen hundertjährigen Ereignis ($h_N = 48,9$ mm) das Überflutungsvolumen deutlich reduzieren. Mit zunehmender Niederschlagsintensität nimmt der relative Effekt der Anlagen ab, allerdings erzielen die auf $T = 100$ a dimensionierten Versickerungsanlagen selbst bei einem extremen einstündigen Regenereignis ($h_N = 100$ mm) noch eine große Reduzierung. Insgesamt haben die intensiven Grün- und Retentionsdächer von allen untersuchten Anlagen den größten Effekt und können selbst das 100 mm Niederschlagsereignis zurückhalten. Die Leistung der extensiven Gründächer liegt geringfügig unter der auf $T = 100$ a bemessenen Mulden. Die Zisternen sind vergleichbar mit den auf $T = 5$ a bemessenen Mulden, wobei ihre Leistungsfähigkeit vom Füllstand zu Beginn des Niederschlagsereignisses abhängt. Retentionszisternen haben eine deutlich größere Wirkung als Zisternen und erzielen eine Leistung, die leicht unter den auf $T = 100$ a dimensionierten Mulden liegt. Hydrologisch optimierte Baumstandorte und Baumrigolen zeigen den geringsten Effekt und sind dadurch selbst bei hohen Implementierungsgraden nicht ausreichend zum Überflutungsschutz geeignet.

Die RWBA reagieren allgemein robust gegenüber verschiedenen Niederschlagsverteilungen und können Intensitätsspitzen abpuffern. Die Regendauer beeinflusst insbesondere die Leistungsfähigkeit von Versickerungsanlagen, die bei langanhaltendem

Niederschlag auf durchlässigen Böden besonders wirksam sind. Die räumliche Anordnung spielt eine entscheidende Rolle: Eine gezielte Platzierung um Überflutungsschwerpunkte maximiert die Überflutungsreduzierung. Der Effekt der RWBA zur Überflutungsreduzierung kann nur bedingt auf andere Einzugsgebiete übertragen werden. Dennoch können die Ergebnisse für eine erste Priorisierung geeigneter RWBA in neuen Gebieten dienen, da die relative Wirksamkeit der Systeme gebietsunabhängig vergleichbar bleibt.

Abstract

As a consequence of climate change, an increase in the frequency and intensity of heavy rainfall events is expected. Highly impervious urban areas being particularly vulnerable to such events and the resulting floods. Conventional urban drainage systems are not designed to handle exceptional and extreme heavy rainfall events without causing flooding. Nature-based solutions (NBS) can offer a potential solution to enhance the resilience of existing drainage systems against heavy rainfall. This study uses modelling to examine the effectiveness of various NBS – infiltration systems, green roofs, rainwater harvesting tanks and engineered street trees – in an urban study area. By employing a coupled 1D/2D simulation model and SWMM-LID approaches to represent NBS, the reduction in flooding is quantified and the performance of the systems is comparatively evaluated. Different implementation degrees, rainfall distributions, rainfall durations, spatial arrangements of NBS and the transferability of results to other catchment areas are analysed.

The performance comparison of the systems shows that infiltration systems dimensioned to $T = 5$ a significantly reduce flood volume even during a 100-year event ($h = 48.9$ mm). As rainfall intensity increases, the effectiveness of the systems decreases. However, infiltration systems dimensioned to $T = 100$ a still achieve substantial flood reduction even during extreme rainfall ($h = 100$ mm). Overall, intensive green and retention roofs have the greatest effect among all examined NBS and can even retain the 100 mm rainfall event. The performance of extensive green roofs is slightly below that of swales dimensioned to $T = 100$ a. Rainwater harvesting tanks (RWHT) are comparable to swales dimensioned to $T = 5$ a, though their performance depends on their initial fill level at the start of the rainfall event. Retention RWHT are significantly more effective than standard RWHT, performing slightly below swales dimensioned to $T = 100$ a. Hydrologically optimized tree locations and tree trenches show the least effect and are therefore insufficient for flood protection even at high implementation degrees.

Generally, NBS respond robustly to different rainfall distributions and can buffer intensity peaks. Rainfall duration particularly affects the performance of infiltration systems, which are especially effective during prolonged rainfall on permeable soils. Spatial arrangement plays a crucial role: targeted placement around flood hotspots maximizes flood reduction. The effectiveness of NBS in mitigating flooding can only be partially transferred to other catchment areas. Nevertheless, the results can serve as an initial prioritization of suitable NBS in new areas, as the relative effectiveness of the systems remains comparable regardless of location.

Liste mit Veröffentlichungen

Teile der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse wurden bereits vorab in einer wissenschaftlichen Zeitschrift sowie in den Tagungsbänden einer internationalen und einer nationalen Konferenz veröffentlicht:

Neumann, Jonas; Scheid, Christian; Dittmer, Ulrich (2024): Quantifizierung und Übertragbarkeit von Effekten dezentralen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen zur Minderung von Starkregenüberflutungen. Posterbeitrag. In: Scientific Board der Aqua Urbanica (Hg.): Aqua Urbanica 2024. URBANES NIEDER-SCHLAGSWASSERMANAGEMENT Herausforderungen – Möglichkeiten – Grenzen. Aqua Urbanica. Graz, 23.-24. September. Technische Universität Graz. <https://doi.org/10.3217/qvycb-56751>.

Neumann, Jonas; Scheid, Christian; Dittmer, Ulrich (2024): Model-based investigations for the potential of decentralised Blue-Green Infrastructure for pluvial flood mitigation. Konferenzbeitrag. In: IWA (Hg.): 16th International Conference on Urban Drainage. Delft, 09.-15. Juni.

Neumann, Jonas; Scheid, Christian; Dittmer, Ulrich (2024): Potential of Decentral Nature-Based Solutions for Mitigation of Pluvial Floods in Urban Areas – A Simulation Study Based on 1D/2D Coupled Modeling. In: *Water* 16 (6), S. 811. <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/6/811>.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Problemstellung..... | 1 |
| 1.2 | Zielsetzung und Vorgehensweise..... | 2 |
| 2 | Theoretische Grundlagen und Kenntnisstand | 6 |
| 2.1 | Starkregenereignisse | 6 |
| 2.1.1 | Definition und Kategorisierung..... | 6 |
| 2.1.2 | Einfluss des Klimawandels..... | 8 |
| 2.2 | Niederschlags-Abfluss-Modellierung..... | 9 |
| 2.2.1 | Grundlagen..... | 10 |
| 2.2.2 | 1D-hydrodynamische Modelle | 13 |
| 2.2.3 | 2D-hydrodynamische Modelle | 14 |
| 2.2.4 | Gekoppelte 1D/2D-hydrodynamische Modelle | 16 |
| 2.3 | Regenwasserbewirtschaftung im Kontext Starkregen..... | 17 |
| 2.3.1 | Versickerungsanlagen | 19 |
| 2.3.2 | Gründächer | 23 |
| 2.3.3 | Zisternentypen | 27 |
| 2.3.4 | Modifizierte Straßenbäume | 29 |
| 2.4 | Modellierung der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen..... | 31 |
| 2.5 | Kenntnisstand zur Wirksamkeit von Regenwasserbewirtschaftungsanlagen zur Starkregenvorsorge | 38 |
| 2.5.1 | Gegenüberstellung von Studien | 38 |
| 2.5.2 | Wirkung von Regenwasserbewirtschaftungsanlagen zur Starkregenvorsorge..... | 41 |
| 2.5.3 | Vergleich der Wirkung verschiedener Anlagentypen..... | 43 |
| 2.5.4 | Fazit und Forschungsbedarf..... | 45 |
| 3 | Material und Methoden | 46 |
| 3.1 | Modellgebiete..... | 46 |
| 3.1.1 | Untersuchungsgebiet..... | 46 |
| 3.1.2 | Validierungsgebiet 1..... | 47 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.1.3 | Validierungsgebiet 2..... | 48 |
| 3.1.4 | Datengrundlage..... | 49 |
| 3.2 | Modellaufbau..... | 52 |
| 3.3 | Plausibilisierung der Modelle und Einfluss des Kanalnetzes | 54 |
| 3.4 | Niederschlagslastfälle und Szenarien | 56 |
| 3.5 | Aufbau, Dimensionierung und Modellparameter der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen | 60 |
| 3.5.1 | Versickerungsanlagen | 60 |
| 3.5.2 | Gründächer | 71 |
| 3.5.3 | Zisternentypen | 79 |
| 3.5.4 | Modifizierte Straßenbäume | 83 |
| 3.6 | Modellintegration der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen..... | 89 |
| 3.6.1 | Implementierung | 89 |
| 3.6.2 | Räumliche Anordnung..... | 92 |
| 3.7 | Modellanwendung und Kriterien zur Auswertung der Ergebnisse | 93 |
| 4 | Ergebnisse und Diskussion | 95 |
| 4.1 | Vergleich der Überflutungsminderung durch die Regenwasserbewirtschaftungsanlagen | 95 |
| 4.2 | Einfluss des Implementierungsgrades der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen | 102 |
| 4.3 | Einfluss der zeitlichen Niederschlagsverteilung | 106 |
| 4.4 | Einfluss der Regendauer | 108 |
| 4.5 | Einfluss der räumlichen Verteilung der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen | 110 |
| 5 | Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Einzugsgebiete..... | 114 |
| 5.1 | Erstellung und Anwendung von Wirkungskurven..... | 114 |
| 5.2 | Übertragbarkeit der Wirkungskurven | 115 |
| 5.2.1 | Vergleich Wirkungskurven | 116 |
| 5.2.2 | Vergleich modifizierter Wirkungskurven | 121 |
| 5.2.3 | Gemittelte Wirkungskurve | 122 |
| 5.3 | Fazit | 123 |
| 6 | Schlussfolgerungen..... | 125 |
| 6.1 | Vergleichende Bewertung des überflutungsmindernden Effekts der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen | 125 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.2 | Einfluss des Implementierungsgrades der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen | 128 |
| 6.3 | Einfluss der Niederschlagscharakteristik | 128 |
| 6.4 | Einfluss der räumlichen Verteilung der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen | 128 |
| 6.5 | Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Einzugsgebiete..... | 129 |
| 7 | Ausblick..... | 130 |
| | Literaturverzeichnis | 132 |
| | Anhangsverzeichnis..... | 138 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 2-1: | Verlauf des Abflussbildungsprozesses für eine unbefestigte Fläche (eigene Darstellung in Anlehnung an DWA-M 165-1 (DWA 2021))..... | 11 |
| Abbildung 2-2: | Untersuchte RWBA. Versickerungsanlagen: (a) , (b) , (c) ; Gründächer: (d) , (e) , (f) ; Zisternentypen: (g) , (h) , (i) ; modifizierte Straßenbäume: (j) , (k) | 19 |
| Abbildung 2-3: | Versickerungsmulde..... | 21 |
| Abbildung 2-4: | Rigole..... | 22 |
| Abbildung 2-5: | Mulden-Rigolen-Element..... | 23 |
| Abbildung 2-6: | Einschichtiges extensives Gründach (Quelle: Paul Bauder GmbH & Co. KG, Gründach-Aufbau BauderGREEN Extensiv Sedumdach einfach) | 24 |
| Abbildung 2-7: | Mehrschichtiges intensives Gründach (Quelle: Paul Bauder GmbH & Co. KG, Gründach-Aufbau BauderGREEN Intensiv Dachgarten Stauden) | 25 |
| Abbildung 2-8: | Retentionsdach mit Kunststoff-Rigolenelementen (Quelle: Paul Bauder GmbH & Co. KG, Gründach-Aufbau BauderGREEN Retention System Drossel) | 26 |
| Abbildung 2-9: | Zisterne mit Entnahmerohr | 27 |
| Abbildung 2-10: | Retentionszisternen, (a) ungedrosselte Variante und (b) gedrosselt Variante | 28 |
| Abbildung 2-11: | Hydrologisch optimierter Baumstandort..... | 30 |
| Abbildung 2-12: | Baumrigole mit Speicherelement | 31 |
| Abbildung 2-13: | Darstellung des SUDS-Elements <i>bio-retention cell</i> (eigene Darstellung in Anlehnung an Rossman und Huber (2016)) | 32 |
| Abbildung 3-1: | Lage der Modellgebiete, Abgrenzung über Kanaleinzugsgebiet (orange). Je Gebiet sind die Flächenanteile in einem Kreisdiagramm dargestellt | 46 |
| Abbildung 3-2: | Untersuchungsgebiet..... | 47 |
| Abbildung 3-3: | Validierungsgebiet 1..... | 48 |
| Abbildung 3-4: | Validierungsgebiet 2..... | 49 |
| Abbildung 3-5: | Darstellung der Straßenflächen (dunkelgrau: Asphalt, hellgrau: Pflaster), Gebäudeflächen (rot), Hof- und Wegeflächen (beige), übrige Fläche (grün) und Straßenbruchkanten (schwarze Linie) eines Häuserblocks im Untersuchungsgebiet. Aus den | |

| | | |
|-----------------|---|----|
| | Gebäudeflächen wurden die Hofdurchfahrten „ausgestanzt“ (Beispiel markiert durch schwarzen Kreis)..... | 51 |
| Abbildung 3-6: | Darstellung der befestigten Flächen: Dachfläche (rot umrandet) angeschlossen an Schacht (violett), Straßenflächen (dunkelgrau: Asphalt, hellgrau: Pflaster), Hof- und Wegeflächen (beige). Die Hofdurchfahrt (hellgrau) befindet sich mittig in der Dachfläche | 53 |
| Abbildung 3-7: | Vergleich der maximalen Wasserstände infolge R1E (T = 100 a, D = 60 min)..... | 56 |
| Abbildung 3-8: | Intensität bei einer (a) Euler Typ 2 Verteilung und (b) Blockregenverteilung für R1E und R1B | 57 |
| Abbildung 3-9: | Aufbau des SUDS-Elements <i>rain garden</i> zur Abbildung der Versickerungsmulde..... | 60 |
| Abbildung 3-10: | Aufbau des SUDS-Elements <i>rain barrel</i> zur Abbildung der Rigole..... | 66 |
| Abbildung 3-11: | Aufbau des SUDS-Elements <i>infiltration trench</i> zur Abbildung des Mulden-Rigolen-Elements | 69 |
| Abbildung 3-12: | Aufbau des SUDS-Elements <i>green roof</i> zur Abbildung des intensiven und extensiven Gründaches | 72 |
| Abbildung 3-13: | Aufbau des SUDS-Elements <i>bio-retention cell</i> zur Abbildung des Retentionsdaches | 74 |
| Abbildung 3-14: | Aufbau des SUDS-Elements <i>rain barrel</i> zur Abbildung der Zisterne und ungedrosselten Retentionszisterne | 79 |
| Abbildung 3-15: | Aufbau des SUDS-Elements <i>rain barrel</i> zur Abbildung der gedrosselten Retentionszisterne..... | 81 |
| Abbildung 3-16: | Gesamtabfluss (Überlauf- und Drosselablauf) aus der ungedrosselten und gedrosselten Retentionszisterne infolge R1B und R2B..... | 83 |
| Abbildung 3-17: | Aufbau des SUDS-Elements <i>rain garden</i> zur Abbildung des hydrologisch optimierten Baumstandortes | 84 |
| Abbildung 3-18: | Aufbau des SUDS-Elements <i>bio-retention cell</i> zur Abbildung der Baumrigole..... | 86 |
| Abbildung 3-19: | Implementierungsmöglichkeiten von Mulden | 90 |
| Abbildung 3-20: | Links: Straßenfläche, aufgeteilt in 120 m ² große Polygone (blau) und Standorte der Straßenbäume (grün). Rechts: Ausgewählte Polygone, die im Modell als <i>subcatchments</i> an die modifizierte Straßenbäume angeschlossen werden..... | 92 |
| Abbildung 3-21: | Links: Heterogene Verteilung der RWBA (50 % der Dächer als Gründächer ausgeführt); rechts: Homogene Verteilung der RWBA (50 % jeder Dachfläche als Gründach ausgeführt)..... | 93 |
| Abbildung 4-1: | Simulationsergebnisse infolge R1E bei einem RWBA Implementierungsgrad von 100 % für Versickerungsanlagen (blau), Gründächer (türkis), Zisternenarten (grau) und modifizierte Straßenbäume (braun)..... | 96 |

| | | |
|-----------------|---|-----|
| Abbildung 4-2: | Maximale Wasserstände im Überflutungsschwerpunkt infolge R1E für das Referenzmodell und den RWBA (Implementierungsgrad 100 %) | 97 |
| Abbildung 4-3: | Simulationsergebnisse infolge R2E bei einem RWBA Implementierungsgrad von 100 % für Versickerungsanlagen (blau), Gründächer (türkis), Zisternenarten (grau) und modifizierte Straßenbäume (braun) | 99 |
| Abbildung 4-4: | Maximale Wasserstände im Überflutungsschwerpunkt infolge R2E für das Referenzmodell und den RWBA (Implementierungsgrad 100 %) | 100 |
| Abbildung 4-5: | Reduzierung des Überflutungsvolumen durch RWBA in Abhängigkeit des Implementierungsgrades infolge R1E | 103 |
| Abbildung 4-6: | Maximale Wasserstände im Überflutungsschwerpunkt infolge R1E. Die schwarzen Pfeile markieren den tiefsten Punkt im Straßenraum | 104 |
| Abbildung 4-7: | Reduzierung des Überflutungsvolumen durch RWBA in Abhängigkeit des Implementierungsgrades infolge R2E | 105 |
| Abbildung 4-8: | Prozentualer Unterschied des Überflutungsvolumens zwischen Euler Typ 2 (R1E) und Blockregen (R1B) Niederschlagsbelastung für das Referenzmodell und den verschiedenen RWBA (Implementierungsgrad 100 %) | 107 |
| Abbildung 4-9: | Prozentualer Unterschied des Überflutungsvolumens zwischen R1E und R1E6 für das Referenzmodell und den verschiedenen RWBA (Implementierungsgrad 100 %) | 109 |
| Abbildung 4-10: | Maximale Wasserstände im Überflutungsschwerpunkt infolge R1E bei Retentionsdächern mit einen Implementierungsgrad von 50,3 %. Die schwarzen Pfeile markieren den tiefsten Punkt im Straßenraum | 111 |
| Abbildung 4-11: | Maximale Wasserstände im Überflutungsschwerpunkt infolge R1E bei Retentionsdächern mit einen Implementierungsgrad von 49,7 %. Die schwarzen Pfeile markieren den tiefsten Punkt im Straßenraum | 113 |
| Abbildung 5-1: | Erstellung und Anwendung der Wirkungskurve | 115 |
| Abbildung 5-2: | Vergleich der Wirkungskurven zwischen den Modellgebieten R1E | 118 |
| Abbildung 5-3: | Vergleich der Wirkungskurven zwischen den Modellgebieten infolge R2E | 120 |
| Abbildung 5-4: | Auswertung Straßenraum: Vergleich der Wirkungskurven zwischen den Modellgebieten infolge R2E | 122 |
| Abbildung 5-5: | Gemittelte Wirkungskurve (rot) für Mulden 5 a infolge R1E. Die gestrichelten Teilsegmente basieren auf einer Extrapolation der Ergebnisse | 123 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|---------------|---|----|
| Tabelle 1-1: | Zusammenstellung der Forschungsziele mit Beschreibung des Hintergrunds beziehungsweise der Forschungslücke sowie der Realisierung..... | 4 |
| Tabelle 2-1: | Ortsunabhängiger Starkregenindex von 1 bis 12 in Abhängigkeit der Jährlichkeit und unter Berücksichtigung von Erhöhungsfaktoren (Schmitt et al. 2018) | 8 |
| Tabelle 2-2: | In den Studien untersuchte RWBA..... | 39 |
| Tabelle 2-3: | Vergleich der Reduzierung des Überflutungsvolumen durch RWBA verschiedener Simulationsstudien..... | 42 |
| Tabelle 2-4: | Anfangsverlustrhöhe und bewirtschaftete Fläche RWBA (Webber et al. 2020) | 44 |
| Tabelle 3-1: | Datengrundlage zum Aufbau der Simulationsmodelle in den Modellgebieten..... | 50 |
| Tabelle 3-2: | Bestandteile der Kanalnetzmodelle | 51 |
| Tabelle 3-3: | Gewählte Abfluss- und Rauheitsbeiwerte der befestigten Flächen | 53 |
| Tabelle 3-4: | Eigenschaften der als Simulationsinput verwendeten Modellregen..... | 57 |
| Tabelle 3-5: | Anzahl der simulierten Szenarien..... | 59 |
| Tabelle 3-6: | Vordimensionierung der Versickerungsmulden gemäß DWA-A 138-1 (DWA 2024) | 61 |
| Tabelle 3-7: | Modellparameter des SUDS-Elements <i>rain garden</i> zur Abbildung der Versickerungsmulde (Anfangskonfiguration) | 62 |
| Tabelle 3-8: | Parameter der Versickerungsmulde (Anfangskonfiguration)..... | 63 |
| Tabelle 3-9: | Simulationsergebnisse mit Anfangskonfiguration bei einer Blockregenbelastung von $T = 7$ a, $D = 60$ min..... | 63 |
| Tabelle 3-10: | Anpassung des k_i -Werts..... | 63 |
| Tabelle 3-11: | Simulationsergebnisse mit angepassten k_i -Wert bei einer Blockregenbelastung von $T = 6$ a, $D = 45$ min..... | 64 |
| Tabelle 3-12: | Anpassung der hydraulischen Leitfähigkeit im Modell | 64 |
| Tabelle 3-13: | Simulationsergebnisse mit angepasster hydraulischer Leitfähigkeit bei einer Blockregenbelastung von $T = 6$ a, $D = 60$ min..... | 64 |
| Tabelle 3-14: | Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der auf $T = 5$ a und 100 a bemessenen Versickerungsmulden | 66 |

| | | |
|---------------|--|----|
| Tabelle 3-15: | Vordimensionierung der Rigole gemäß DWA-A 138-1 (DWA, 2020)..... | 67 |
| Tabelle 3-16: | Simulationsergebnisse der Rigole bei einer Blockregenbelastung von T = 7 a, D = 60 min | 67 |
| Tabelle 3-17: | Simulationsergebnisse der Rigole mit angepassten k_i -Wert bei einer Blockregenbelastung von T = 6 a, D = 60 min | 67 |
| Tabelle 3-18: | Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der auf T = 5 a bemessenen Rigole | 68 |
| Tabelle 3-19: | Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der auf T = 100 a bemessenen Rigole..... | 68 |
| Tabelle 3-20: | Vordimensionierung des Mulden-Rigolen-Elements gemäß DWA-A 138-1 (DWA, 2020)..... | 69 |
| Tabelle 3-21: | Simulationsergebnisse des Mulden-Rigolen-Elements bei einer Blockregenbelastung von T = 5 a, D = 90 min..... | 70 |
| Tabelle 3-22: | Simulationsergebnisse des Mulden-Rigolen-Elements bei einer Blockregenbelastung von T = 6 a, D = 60 min..... | 70 |
| Tabelle 3-23: | Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung des auf T = 5 a bemessenen Mulden-Rigolen-Elements | 71 |
| Tabelle 3-24: | Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung des auf T = 100 a bemessenen Mulden-Rigolen-Elements | 71 |
| Tabelle 3-25: | Schichten des extensiven Gründaches..... | 72 |
| Tabelle 3-26: | Schichten des intensiven Gründaches | 73 |
| Tabelle 3-27: | Schichten des Retentionsdaches..... | 73 |
| Tabelle 3-28: | Zusammenstellung der in den Publikationen verwendeten Modellparametern | 75 |
| Tabelle 3-29: | Festgelegte Modellparameter zur Abbildung der Gründächer | 77 |
| Tabelle 3-30: | Eigenschaften der Regen..... | 78 |
| Tabelle 3-31: | Vergleich des Abflussverhalten der verschiedenen Gründächer | 79 |
| Tabelle 3-32: | Bemessungsparameter und Volumen der Zisterne | 80 |
| Tabelle 3-33: | Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der Zisterne | 80 |
| Tabelle 3-34: | Simulationsergebnisse bei R1B (T = 100 a, D = 60 min) | 81 |
| Tabelle 3-35: | Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der gedrosselten Retentionszisterne | 82 |
| Tabelle 3-36: | Simulationsergebnisse Retentionszisternen | 82 |
| Tabelle 3-37: | Aufbau des hydrologisch optimierten Baumstandorts (angelehnt an (BlueGreenStreets 2022))..... | 84 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Tabelle 3-38: | Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung des hydrologisch optimierten Baumstandorts | 85 |
| Tabelle 3-39: | Simulationsergebnisse bei einer Blockregenbelastung von T = 6 a, D = 60 min für den HOB, 78 m ² abflusswirksame Fläche angeschlossen | 86 |
| Tabelle 3-40: | Aufbau der Baumrigole (Empfehlung aus BGS (2022)) | 86 |
| Tabelle 3-41: | Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der Baumrigole | 88 |
| Tabelle 3-42: | Simulationsergebnisse bei einer Blockregenbelastung von T = 6 a, D = 60 min für die Baumrigole, 120 m ² abflusswirksame Fläche angeschlossen | 89 |
| Tabelle 3-43: | Simulationsergebnisse bei unterschiedlicher Implementierung von Mulden | 91 |
| Tabelle 3-44: | Abflusskomponenten der RWBA | 94 |
| Tabelle 4-1: | Reduktion des Überflutungsvolumens je Implementierungsschritt..... | 105 |
| Tabelle 4-2: | Vergleich der Zuflüsse und Abflüsse aus den Mulden für R1E und R1E6..... | 110 |
| Tabelle 5-1: | Vergleich der Wirkungskurven bei einem Bewirtschaftungsanteil von 23 %..... | 117 |
| Tabelle 5-2: | Überflutungsvolumen je Hektar Gebietsfläche im Referenzmodell für die Niederschlagsbelastungen R1E und R2E | 117 |
| Tabelle 6-1: | Kategorisierung und Ranking der untersuchten RWBA hinsichtlich ihres Effekts zur Überflutungsminderung | 127 |

Abkürzungen

| Abkürzung | Erläuterung |
|------------------|--|
| ALKIS | Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem |
| BMP | Best Management Practices |
| BWB | Berliner Wasserbetriebe |
| DGM | Digitales Geländemodell |
| DGM1 | Digitales Geländemodell mit der Gitterweite 1 m |
| DIN | Deutsches Institut für Normung e. V. |
| DIN EN | Europäische Norm |
| DWA | Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall |
| EPA | Environmental Protection Agency |
| EZG | Einzugsgebiet |
| FIS-Broker | Fachübergreifendes Informationssystem, Geoportal der Stadt Berlin |
| FLL | Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. |
| GDV | Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft |
| GI | Green Infrastructure |
| GIS | Geoinformationssystem |
| HOB | hydrologisch optimierten Baumstandort |
| ISiE | Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung |
| LID | Low Impact Development |
| MRE | Mulden-Rigolen-Element |
| R0B | Blockregen mit $T = 5$ a, $h_N = 25$ mm, $D = 60$ min und SRI 2 |
| R1B | Blockregen mit $T = 100$ a, $h_N = 48,9$ mm, $D = 60$ min und SRI 7 |
| R1E | Euler Typ 2 Regen mit $T = 100$ a, $h_N = 48,9$ mm, $D = 60$ min und SRI 7 |
| R1E6 | Euler Typ 2 Regen $T = 100$ a, $h_N = 74,3$ mm, $D = 360$ min und SRI 7 |
| R2E | Euler Typ 2 Regen mit $h_N = 100$ mm, $D = 60$ min und SRI 10 |
| RWBA | Dezentrale Regenwasserbewirtschaftungsanlagen |
| SRI | Starkregenindex |
| SUDS | Sustainable Urban Drainage Systems |
| SWMM | Storm Water Management Model |
| WHG | Wasserhaushaltsgesetz |
| WSUD | Water Sensitive Urban Design |

Formelzeichen

| Zeichen | Erläuterung |
|----------------|---|
| A_1 | Fläche |
| A | Fließquerschnitt normal zur Sohle |
| AC | Rechenwert für die Bemessung, der sich aus der Summe aller an die Versickerungsanlage angeschlossenen Teilflächen, multipliziert mit dem jeweils zugehörigen Abflussbeiwert |
| $A_{E,b,a,i}$ | befestigte, angeschlossene Teilfläche im Einzugsgebiet der Versickerungsanlage |
| $A_{E,nb,a,i}$ | nicht befestigte, angeschlossene Teilfläche im Einzugsgebiet der Versickerungsanlage |
| A_i | Auffangfläche, deren Abfluss der Zisterne zufließt |
| $A_{S,m}$ | mittlere Versickerungsfläche der Anlage |
| A_S | erforderliche Versickerungsfläche |
| A_{VA} | überregnete Fläche einer oberirdischen Versickerungsanlage |
| A_x | durchströmte Querschnitt |
| b_R | Breite der Rigole |
| C_{3D} | Abflussbeiwert der Dränage |
| c | Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit |
| C_s | Spitzenabflussbeiwert der Auffangfläche |
| c_s | Beiwert zur Berücksichtigung der seitlichen Zuströmung |
| D_1 | Freibordhöhe auf der Oberfläche |
| d_1 | Einstautiefe des Wassers auf der Oberfläche |
| D_2 | Dicke der Bodenschicht |
| D_3 | Speicherschichtdicke |
| d_3 | Wasserstand in der Speicherschicht |
| D_{3D} | Höhe des Dränageablaufs über den Boden der Speicherschicht |
| D | Versickerungsleistung |
| d_d | gewählte Trockenperiode |
| e_1 | Evapotranspirationsrate auf der Oberflächenschicht |
| e_2 | Evapotranspirationsrate in der Bodenschicht |
| e_i | Oberflächenertragsbeiwert |
| f_0 | Anfangsinfiltrationsrate |
| f_1 | Infiltrationsrate des Oberflächenwassers in die Bodenschicht |
| f_2 | Perkolationsrate des Wassers durch die Bodenschicht in die Speicherschicht |
| f_3 | Exfiltrationsrate des Wassers von der Speicherschicht in den anstehenden Boden |

| Zeichen | Erläuterung |
|----------------|--|
| F | Kumuliertes Infiltrationsvolumen über ein Regenereignis |
| f_e | Endinfiltrationsrate |
| f_K | resultierende Korrekturfaktor Wasserdurchlässigkeit |
| $f_{Methode}$ | Korrekturfaktor für Bestimmungsmethode |
| f_{Ort} | Korrekturfaktor zur Erfassung der Variabilität der Bodenverhältnisse und Umfang/Anzahl der Versuchsstandorte |
| f_Z | Zuschlagsfaktor |
| $f(t)$ | Infiltrationsrate zum Zeitpunkt t |
| g | Erdbeschleunigung |
| h_3 | Hydraulische Druckhöhe über der Dränage |
| h | Wassertiefe oder Druckhöhe normal zur Sohle |
| HCO | Abklingkonstante, beschreibt wie die Leitfähigkeit mit abnehmender Feuchtigkeit abnimmt |
| h_a | Jahresniederschlagshöhe |
| h_M | maximale Einstauhöhe der Mulde |
| h_N | Niederschlagshöhe |
| h_R | Höhe der Rigole |
| i | Niederschlagsrate |
| I | Gefälle |
| I_R | Reibungsgefälle |
| I_s | Sohlgefälle |
| K_{2S} | Hydraulische Leitfähigkeit des wassergesättigten Bodens |
| k | Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens, z. B. k_f -Wert |
| k_i | bemessungsrelevante Infiltrationsrate |
| k_R | Rückgangskonstante |
| L_R | Länge der Rigole |
| n_1 | Oberflächenrauheit |
| n_3 | Oberflächenrauheit der Dränmatte |
| n | Bemessungshäufigkeit |
| n | Rauheit nach Manning, abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit |
| q_0 | Zufluss von angeschlossenen Flächen |
| q_1 | Oberflächenabfluss oder Überlauf |
| q_3 | Dränageabfluss |
| q | seitlicher Zufluss |
| q_x | Durchfluss in x-Richtung (pro Breite) |
| q_y | Durchfluss in y-Richtung (pro Breite) |
| Q | Abfluss |
| Q_{Dr} | mittlerer, konstanter Drosselabfluss |
| Q_s | Versickerungsleistung |
| Q_i | Abflussbeiwert der Teilfläche |

| Zeichen | Erläuterung |
|----------------|--|
| Q_{zu} | Zufluss der Versickerungsanlage während der Dauerstufe D |
| r_{hy} | hydraulischer Radius |
| $r_{D(n)}$ | Regenspende der Dauerstufe D und Bemessungshäufigkeit n |
| S_1 | Gefälle |
| s_R | Speicherkoefizient, Anteil des verfügbaren Speichervolumens in der Rigole |
| t | Zeit(-koordinate) |
| T | Jährlichkeit |
| \vec{v} | 2-dimensionaler Geschwindigkeitsvektor mit den horizontalen Komponenten in x- und y-Richtung |
| v | mittlere Fließgeschwindigkeit im Querschnitt |
| v_x | Fließgeschwindigkeit in x-Richtung |
| v_y | Fließgeschwindigkeit in y-Richtung |
| V_M | erforderliches Speichervolumen der Mulde |
| V_M | erforderliches Speichervolumen der Mulde |
| V_{MR} | erforderliches Speichervolumen des MRE |
| V_N | Nutzvolumen der Zisterne |
| V_R | Speichervolumen der Rigole |
| V_R | erforderliches Speichervolumen der Rigole |
| V_{RZ} | Gesamtvolumen der Retentionszisterne |
| V_{Re} | Retentionsvolumen der Zisterne |
| V_{VA} | erforderliches Speichervolumen |
| W_1 | Kantenlänge der Fläche, an der Abfluss gesammelt wird |
| x | Wegkoordinate |
| $Y_{R,a}$ | Regenwasserertrag pro Jahr |
| z | Geländehöhe |
| η_{3D} | Abflussexponent der Dränage |
| η | Beiwert zum hydraulischen Wirkungsgrad der Behandlung |
| ν_T | Viskosität |
| θ_2 | Feuchtigkeitsgehalt der Bodenschicht |
| θ_{20} | Feuchtigkeitsgehalt an der Oberseite der Bodenschicht |
| θ_{FC} | Feldkapazität des Bodens |
| ϕ_1 | Anteil des Freibords über der Oberflächenschicht ohne Vegetation |
| ϕ_2 | Porosität (Porenvolumen / Gesamtvolumen) der Bodenschicht |
| ϕ_3 | Hohlraumanteil der Speicherschicht (Hohlraumvolumen / Gesamtvolumen) |
| ψ_2 | Saughöhe an der im Boden gebildeten Infiltrations-Feuchtefront |
| ∇ | Nabla-Operator, partielle Ableitung in x- und y- Richtung |

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Angesichts des Klimawandels ist mit einer Zunahme sowie einer Intensivierung von Starkregenereignissen zu rechnen (Lee et al. 2023). Diese konvektiven Niederschlagsereignisse zeichnen sich durch eine sehr hohe Niederschlagsintensität aus und können räumlich überall auftreten. Insbesondere in Städten steigt die Überflutungsgefährdung aufgrund der hohen Flächenversiegelung und der daraus resultierenden Oberflächenabflüsse im Starkregenfall. Weltweit leben bereits 57 % der Menschen in Städten (Statista 2024) und sind somit potenziell betroffen. Es wird erwartet, dass dieser Bevölkerungsanteil weiter ansteigt und im Jahr 2030 bei 60 % liegt (Destatis 2024). Neben der Gefahr für Leib und Leben verursachen Überflutungen aufgrund der dichten Bebauung und Konzentration von Sachwerten erhebliche ökonomische Schäden. Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) beziffert den Schaden durch Starkregen an Wohngebäuden in Deutschland mit 6,7 Mrd. Euro für den Zeitraum von 2002 bis 2017, wobei 1,3 Mio. Gebäude betroffen waren (GDV 2020).

Konventionelle „graue“ Entwässerungssysteme leiten Schmutz- und Niederschlagswasser unterirdisch aus Siedlungsgebieten ab. Ihr zentrales Ziel im Hinblick auf den Niederschlagsabfluss ist der Schutz vor Überflutungen und Vernässung (DWA 2024). Allerdings werden sie im innerstädtischen Bereich in Deutschland nur auf Jährlichkeiten von $T = 5 - 10$ a bemessen. Zusätzlich muss die zulässige Überflutungshäufigkeit bei intensiven und außergewöhnlichen Starkregenereignissen (Definition nach Schmitt et al. 2018) mit Jährlichkeiten von $T = 30 - 50$ a nachgewiesen werden (DWA 2024, DIN EN 2017). In der Fachwelt besteht Konsens darüber, dass eine Dimensionierung dieser Systeme für extreme Starkregenereignisse ($T > 100$ a) aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll ist (Schmitt et al. 2004). Daher ist es erforderlich, die Resilienz der bestehenden konventionellen Entwässerungsinfrastruktur gegenüber extremen Starkregenereignissen zu verbessern.

Ein möglicher Lösungsansatz sind Maßnahmen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung, wie beispielsweise Entsiegelung, Versickerungsanlagen und Gründächer. Sie reduzieren unter anderem den Abfluss, fördern die Speicherung und Versickerung sowie die Verdunstung von Niederschlagswasser und können so Überflutungen entgegenwirken. Die Maßnahmen und Planungskonzepte sind international etabliert und werden unter den Begriffen *Green Infrastructure*, *Low Impact Development* und *Sustainable Urban Drainage Systems* zusammengefasst (Fletcher et al. 2015). Im Deutschen werden sie als Regenwasserbewirtschaftungsanlagen (RWBA) bezeichnet, wo-

bei zwischen dezentralen und zentralen Anlagen unterschieden wird. Zentrale Anlagen sind in das Entwässerungssystem integriert, wie beispielsweise Regenrückhaltebecken am Auslass eines Teileinzugsgebiets. Dezentrale Anlagen befinden sich hingegen am oder in der Nähe des Entstehungsorts des Abflusses, bevor dieser in die Kanalisation gelangt und sind somit über das Einzugsgebiet verteilt. Sie ermöglichen eine flexible Nachrüstung des bestehenden Entwässerungssystems, ohne dass das Kanalnetz baulich verändert werden muss. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich dezentrale RWBA untersucht, die im Folgenden als RWBA bezeichnet werden.

RWBA wie Versickerungsanlagen werden in der Praxis üblicherweise auf Starkregenereignisse mit einer Jährlichkeit von $T = 5$ a dimensioniert und nicht für den Rückhalt von extremen Starkregenereignissen ($T > 100$ a). Im Forschungsprojekt MURIEL (Benden et al. 2017) wurde die Erweiterung solcher Anlagen zur Starkregenvorsorge zwar qualitativ untersucht, ihr Effekt zur Überflutungsminderung jedoch nicht quantifiziert. Andere RWBA, wie Gründächer, Zisternen und Baumrigolen, können ebenfalls zum Rückhalt von Abfluss im Starkregenfall beitragen. Im Gegensatz zu Versickerungsanlagen werden sie jedoch nicht gezielt für diesen Zweck dimensioniert (mit Ausnahme von Retentionsdächern). Daher ist eine Quantifizierung und Einordnung ihres Effekts zur Überflutungsminderung bei außergewöhnlichen und extremen Starkregenereignissen im Vergleich zu Versickerungsanlagen erforderlich.

Zur Quantifizierung des Effekts von RWBA auf die Überflutungsminderung werden in der Regel Simulationsmodelle eingesetzt, da Messdaten aus Felduntersuchungen oder anderen Quellen nur begrenzt verfügbar sind (Almaaitah et al. 2021). Für die Modellierung von Überflutungen in urbanen Einzugsgebieten hat sich die Verwendung gekoppelter 1D/2D-Modelle als Stand der Technik etabliert. Diese ermöglichen es, sowohl die RWBA als auch das Entwässerungssystem (1D) sowie das Überflutungs geschehen auf der Oberfläche (2D) zu modellieren. Der Aufbau von 1D/2D-Modellen ist jedoch komplex und stellt hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit von (Geo-)Informationen. Daher stellt sich die Frage, inwieweit die überflutungsmindernde Wirkung von RWBA auf andere Einzugsgebiete übertragbar ist, sodass für diese kein eigenes 1D/2D-Modell erstellt werden muss.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das übergeordnete Forschungsziel dieser Arbeit ist der Vergleich und die Bewertung des überflutungsmindernden Effekts verschiedener dezentraler RWBA bei außergewöhnlichen und extremen Starkregenereignissen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden einzelne Teilaspekte in fünf spezifischen Forschungszielen definiert und bearbeitet. In Tabelle 1-1 sind die Forschungsziele mit einer Beschreibung des Hintergrunds und der Forschungslücke sowie der Realisierung zusammengestellt.

RWBA wie Versickerungsanlagen werden standardmäßig nicht auf außergewöhnliche oder extreme Starkregenereignisse dimensioniert. Um ihre Wirkung auf die Überflutungsminderung zu quantifizieren und zu bewerten (1. Forschungsziel), werden in einem Untersuchungsgebiet Simulationen mit unterschiedlich intensiven Starkregenereignissen und verschiedenen Implementierungsgraden der Anlagen durchgeführt. Anschließend werden die Ergebnisse ausgewertet. Dabei werden herkömmlich dimensionierte Mulden, Rigolen und Mulden-Rigolen-Elemente untersucht, die in Deutschland üblicherweise auf $T = 5$ a gemäß DWA-A 138-1 (DWA 2024) bemessen werden. Zusätzlich werden sie in dieser Arbeit auf $T = 100$ a dimensioniert, um den Effekt solch erweiterter Anlagen auf die Überflutungsminderung zu quantifizieren.

Andere RWBA wie Gründächer, Zisternen und Baumrigolen werden im Gegensatz zu Versickerungsanlagen normalerweise nicht anhand der Auftretenswahrscheinlichkeit von Starkregen dimensioniert. Um ihren Effekt zur Überflutungsminderung zu quantifizieren und einordnen zu können (2. Forschungsziel), werden zunächst Gründachaufbauten definiert sowie Zisternen und modifizierte Straßenbäume dimensioniert. Anschließend werden Simulationen mit unterschiedlich intensiven Starkregenereignissen und verschiedenen Implementierungsgraden der Anlagen durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet.

Die Kategorisierung von Starkregenereignissen erfolgt üblicherweise nach der Niederschlagsmenge, die innerhalb einer definierten Regendauer fällt (DWA 2024, Schmitt et al. 2018). Dabei bleibt die zeitliche Niederschlagsverteilung unberücksichtigt, obwohl sie je nach Regenereignis stark variieren kann. Um den Einfluss der Niederschlagsverteilung auf den überflutungsmindernden Effekt dezentraler RWBA zu bewerten (3. Forschungsziel), werden Simulationen mit Euler Typ 2 und Blockregen Verteilungen durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Zusätzlich wird das Anlagenverhalten bei verschiedenen Regendauern von Starkregenereignissen untersucht.

Dezentrale RWBA sind räumlich im Einzugsgebiet verteilt. Im Rahmen des 4. Forschungsziel wird untersucht, welche Auswirkungen eine gezielte Anordnung der Anlagen um den Überflutungsschwerpunkt im Untersuchungsgebiet auf das Überflutungsgeschehen hat. Diese Simulationsergebnisse werden mit Ergebnissen verglichen, bei denen die Anlagen gleichmäßig im Untersuchungsgebiet verteilt sind.

Das Überflutungsgeschehen in einem Einzugsgebiet wird von den Gebietscharakteristika (Topografie, Anteil und Verortung befestigter Flächen, Bodenart, etc...) und der Leistung des Kanalnetzes bestimmt. Diese Randbedingungen sowie das Potenzial von RWBA, die Überflutungen zu reduzieren, sind für jedes Einzugsgebiet unterschiedlich. Für eine detaillierte Untersuchung der Wirkung von RWBA ist daher ein 1D/2D-Modell des Einzugsgebiets erforderlich, dessen Aufbau jedoch komplex ist. Deshalb wird analysiert, inwieweit sich die überflutungsmindernde Wirkung von RWBA auf topografisch ähnliche Einzugsgebiete übertragen lässt (5. Forschungsziel). Dazu werden die Simulationsergebnisse des Untersuchungsgebiets mit denen von zwei benachbarten Validierungsgebieten anhand von Wirkungskurven verglichen.

Tabelle 1-1: Zusammenstellung der Forschungsziele mit Beschreibung des Hintergrunds beziehungsweise der Forschungslücke sowie der Realisierung

| Übergeordnetes Forschungsziel | Hintergrund/Forschungslücke | Realisiert durch |
|---|---|---|
| Vergleich und Bewertung des Effekts von dezentralen RWBA zur Überflutungsminde- rung bei außergewöhnlichen und extremen Starkregenereignissen. | Dezentrale RWBA werden standardmäßig nicht auf außergewöhnliche oder extreme Starkregenereignisse dimensioniert. | Überflutungssimulationen mit außergewöhnlichen und extremen Starkregen bei verschiedenen Implementierungsgraden von dezentralen RWBA. Vergleich der Ergebnisse. |
| Forschungsziele (nummeriert) | Hintergrund/Forschungslücke | Realisiert durch |
| 1. Quantifizierung des Effekts von Versickerungsanlagen zur Starkregenvorsorge, die einerseits standardmäßig dimensioniert werden und andererseits über das übliche Bemessungsniveau erweitert werden. | Versickerungsanlagen werden in der Regel auf T = 5 a bemessen. Welchen Effekt haben auf T = 5 a und auf T = 100 a dimensionierte Anlagen bei außergewöhnlichen und extremen Starkregenereignissen? | Bemessung der Anlagen nach DWA-A 138-1. Vergleich der Simulationsergebnisse bei außergewöhnlichen und extremen Starkregen. |
| 2. Quantifizierung und Einordnung des Effekts von RWBA zur Starkregenvorsorge, die normalerweise nicht nach Auftretenswahrscheinlichkeiten von Starkregen dimensioniert werden. | Gründächer, Zisternen und modifizierte Straßenbäume werden i.d.R. nicht auf den Rückhalt von Starkregen dimensioniert. Welchen Effekt haben sie bei außergewöhnlichen und extremen Starkregenereignissen? | Definition von Gründachaufbauten. Bemessung von Zisternen und modifizierten Straßenbäume in Anlehnung an die Versickerungsanlagen. Vergleich der Simulationsergebnisse bei außergewöhnlichen und extremen Starkregen. |
| 3. Untersuchung des Einflusses der Variabilität von Starkregenereignissen auf den Effekt der Anlagen zur Überflutungsminde- rung. | Untersuchung zur Robustheit der Anlagen gegenüber unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen und Regendauern. | Vergleich der Simulationsergebnisse bei Euler Typ 2 und Blockregenbelastung. Simulation mit Variation der Niederschlagsdauer. |
| 4. Untersuchung der Auswirkung der räumlichen Verteilung der Anlagen auf das Überflutungsgeschehen. | Welchen Einfluss hat die räumliche Konzentration der Anlagen auf das Überflutungsgeschehen? | Vergleich der Ergebnisse bei unterschiedlichen Verteilungen der Anlagen im Untersuchungsgebiet. |
| 5. Analyse der Übertragbarkeit des Effekts der Anlagen auf topografisch ähnliche Einzugsgebiete | Der Aufbau von gekoppelten 1D/2D-Modellen mit Abbildung von RWBA ist sehr aufwendig. Lassen sich die Ergebnisse auf ähnliche Einzugsgebiete übertragen? | Vergleich der Ergebnisse mit zwei benachbarten Validierungsgebieten. Die Anlagenperformance wird über Wirkungskurven verglichen. |

Um die beschriebenen Forschungsziele zu erreichen, wird ein Stadtgebiet modelliert, in dem eine fiktive Anzahl von RWBA umgesetzt wird. Beispielsweise werden in einem Szenario alle Dächer an Mulden angeschlossen oder in einem anderen Szenario die Hälfte jeder Dachfläche als Gründach ausgeführt. Dem Verfasser dieser Arbeit ist bewusst, dass solch hohe Umsetzungsgrade von RWBA unrealistisch und im Bestand

nicht umsetzbar sind. Die Szenarien ermöglichen jedoch einen Vergleich der Wirkung dezentraler RWBA zur Überflutungsminderung untereinander, was das übergeordnete Forschungsziel dieser Arbeit ist. Darüber hinaus wird das Potenzial von RWBA zur Überflutungsminderung unter maximal möglicher Umsetzung aufgezeigt. Für den Bestand bleibt eine solche Potenzialanalyse eine theoretische Betrachtung, doch für die Bauleitplanung von Erschließungsgebieten, in denen eine große Anzahl von RWBA umgesetzt werden soll, sind die Ergebnisse jedoch relevant: Eine Simulation der überflutungsmindernden Wirkung von RWBA in Erschließungsgebieten ist nicht möglich, da die notwendigen Daten (Kanalnetz, Gebäude- und Straßenflächen, etc.) zum Aufbau eines Modells fehlen. Es muss daher auf Simulationsergebnisse bestehender Untersuchungsgebiete zurückgegriffen werden, um ihren Effekt auf die Überflutungsminderung zu quantifizieren.

2 Theoretische Grundlagen und Kenntnisstand

2.1 Starkregenereignisse

Die grundsätzliche Voraussetzung für die Bildung von Wolken und Niederschlag ist die Hebung von feuchter Luft, die dabei abkühlt und kondensiert. Wenn der Hebungsvorgang durch aufsteigende Luft verursacht wird, die sich am Boden über ihr Kondensationsniveau hinaus erwärmt hat, kommt es zu konvektiven Niederschlägen. Dabei werden feuchte, labil geschichtete Luftmassen umgelagert, häufig in Verbindung mit Gewittern und Hagel, weil die vertikale Bewegung der Luftmassen größer ist als die horizontale. Die resultierenden Niederschläge mit einer hohen Intensität und Regenmenge werden als konvektive Starkregen bezeichnet. Sie zeichnen sich durch eine kurze Regendauer und Vorwarnzeit aus. Räumlich können sie überall auftreten, sind aber auf kleine, abgegrenzte Gebiete limitiert. Einzelne Schauerzellen haben eine Ausdehnung von 30 bis 500 km², eine Lebensdauer von ca. 25 - 120 min und eine ungleichmäßige Niederschlagsverteilung. (Maniak 2016)

Für den Begriff Starkregen gibt es keine einheitliche Definition, weshalb im Folgenden verschiedene Kategorisierungsmöglichkeiten für Starkregenereignisse erläutert werden. Als Ergebnis wird die in dieser Arbeit verwendete Kategorisierung festgelegt. Anschließend wird der Einfluss des Klimawandels auf Starkregenereignisse beschrieben.

2.1.1 Definition und Kategorisierung

Eine einheitliche Definition von Starkregenereignissen ist nicht möglich, da sich je nach Klimazone und Standort die charakteristischen Niederschlagsmengen unterscheiden (Baumgartner und Liebscher 1996). Die Ereignisse können nach ihrer Intensität, nach statistischen Auswertungen oder zur Risikokommunikation in einer möglichst niederschweligen Form beschrieben werden. Je nach Anwendungsfall, wie z.B. der Planung baulicher Maßnahmen oder der Warnung der Bevölkerung vor Starkregen, sind andere Beschreibungen sinnvoll.

Intensität und Niederschlagsmenge

Die Intensität eines Starkregenereignisses berechnet sich aus der Niederschlagsmenge (auch Niederschlagshöhe), die in einem definierten Zeitabschnitt fällt. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) warnt vor Starkregen ab einer Niederschlagsmenge von 15 - 25 mm/h oder 20 - 35 mm in 6 h (markante Wetterwarnung). Die beiden weiteren Warnschwellen sind die Unwetterwarnung bei > 25 - 40 mm/h oder > 35 mm in 6 h sowie die Warnung vor extremem Unwetter ab Niederschlagsmengen > 40 mm/h oder > 60 mm in 6 h. (DWD 2025)

Jährlichkeit und Dauer

Im DWA Arbeitsblatt 531 (DWA 2024) wird ein einheitlicher methodischer Rahmen für die Analyse von Starkregenereignissen beschrieben. Darin werden Regenabschnitte von Starkregen mit Jährlichkeiten von $T = 1 - 100$ a und den zugehörigen Regendauern betrachtet. Bei gleicher Jährlichkeit von Ereignissen hängt die Niederschlagshöhe von der Regendauer ab, weshalb Starkregen erst durch die Festlegung der Regendauer, Jährlichkeit und Niederschlagshöhe eindeutig beschrieben werden. Für die Planung baulicher Maßnahmen, wie beispielsweise die Bemessung eines Entwässerungssystems, ist solch eine präzise Definition von Starkregenereignissen anhand statistischer Auswertungen unerlässlich. Eine Überschätzung des Bemessungsstarkregens kann zu erheblichen Mehrkosten beim Bau führen, während eine Unterschätzung ein untragbares Versagensrisiko für das System darstellt. (DWA 2024)

Der DWD stellt flächendeckend für Deutschland Bemessungsniederschläge zur Verfügung. Der Datensatz wird als Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierung und Auswertung vom Deutschen Wetterdienst (KOSTRA-DWD) bezeichnet. Anhand extremwertstatistischer Analysen wurden Langzeitniederschlagsreihen einer Vielzahl von Messstationen ausgewertet. Als Ergebnis wurden Niederschlagshöhen für ein deutschlandweites Rasternetz (Flächenausdehnung je Rasterfeld: 25 km²) in Abhängigkeit verschiedener Dauerstufen und Jährlichkeiten berechnet. Die Dauerstufen umfassen 22 Dauern von $D = 5$ min bis 7 Tage und Jährlichkeiten von $T = 1 - 100$ a. (Junghänel et al. 2023)

Starkregenindex zur Risikokommunikation

Erfahrungen mit Bürgern haben gezeigt, dass für die Risikokommunikation mit der Bevölkerung die zuvor genannte Beschreibung von Starkregen anhand dreier Parameter zu komplex ist (Schmitt et al. 2018). Es bedarf eines einfachen, dimensionslosen Indexes, der mit zunehmendem Wert eine größere Überflutungsgefahr durch das Ereignis angibt. Schmitt et al. (2018) stellen eine allgemein verständliche Einordnung von Starkregenereignissen in Abhängigkeit von deren Jährlichkeit mittels eines 12-stufigen Starkregenindex (SRI) vor, bei dem die Ereignisse vier Starkregenkategorien zugeordnet werden (siehe Tabelle 2-1). Für die SRI-Werte im Bereich von 1 - 7 werden entsprechend lokaler Starkregenstatistiken (KOSTRA-DWD-2020 (DWD 2023) oder statistischer Analyse nach DWA-A 531 (DWA 2024)) direkt ortsspezifische Regenhöhen in Abhängigkeit der Jährlichkeit zugeordnet. Die Niederschlagshöhen für die SRI-Werte 8 - 12 ergeben sich aus der Multiplikation der Niederschlagshöhe für SRI 7 mit dem entsprechenden Erhöhungsfaktor. (Schmitt et al. 2018)

Tabelle 2-1: Ortsunabhängiger Starkregenindex von 1 bis 12 in Abhängigkeit der Jährlichkeit und unter Berücksichtigung von Erhöhungsfaktoren (Schmitt et al. 2018)

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------------|---|-----------------------|---|----|------------------------------|------|---------------------|-------------|-------------|-------------|--------|--|--|
| Jährlichkeit T [a] | 1 | 2 | 3,3 | 5 | 10 | 20 | 25 | 33,3 | 50 | 100 | > 100 | | | |
| Kategorie | Starkregen | | intensiver Starkregen | | | außergewöhnlicher Starkregen | | extremer Starkregen | | | | | | |
| Starkregenindex SRI [-] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | | |
| Erhöhungsfaktor [-] | | | | | | | 1,00 | 1,20 - 1,39 | 1,40 - 1,59 | 1,60 - 2,19 | 2,20 - 2,79 | ≥ 2,80 | | |

Definition im Rahmen dieser Arbeit

Für die Dimensionierung von RWBA, wie z. B. Versickerungsanlagen, ist eine eindeutige Beschreibung der Bemessungsniederschläge anhand von Jährlichkeit, Dauer und Niederschlagshöhe unerlässlich. Versickerungsanlagen werden in der Regel auf Jährlichkeiten von $T = 5$ a bemessen. In dieser Arbeit werden sie darüber hinaus erweitert und auf $T = 100$ a dimensioniert. Die überflutungsmindernde Wirkung der auf $T = 5$ a und 100 a bemessenen Anlagen wird bei einem Starkregenereignisses mit einer Niederschlagshöhe $h_N = 100$ mm (Regendauer $D = 60$ min) untersucht, das nach Schmitt et al. (2018) als extremer Starkregen mit einem SRI von 10 kategorisiert wird. Die Beschreibung dieses Ereignisses anhand einer Jährlichkeit ist nach DWA-A 531 (DWA 2024) nicht vorgesehen.

In dieser Arbeit werden Starkregenereignisse für die Anlagendimensionierung anhand von Jährlichkeit, Dauer und Niederschlagshöhe definiert. Zusätzlich werden Ereignisse mit einer Jährlichkeit von $T \geq 100$ a anhand der Einordnung nach Schmitt et al. (2018) kategorisiert.

2.1.2 Einfluss des Klimawandels

Der anthropogene Klimawandel führt zu einer Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur. Damit steigt auch die potenzielle Niederschlagsmenge, da die Atmosphäre pro Grad Celsius Erwärmung etwa 7 % mehr Wasserdampf aufnehmen kann, was stärkere Niederschläge begünstigt. Allerdings spielen auch weitere Faktoren eine Rolle, wie die großräumige atmosphärische Zirkulation sowie auf Mikroskala die Konvektion und Wolkenphysik. Die Zunahme der Niederschläge wird regional unterschiedlich ausfallen, es ist auch möglich, dass einige Gebiete trockener werden. (Becker et al. 2016)

In Deutschland ist die mittlere Temperatur seit 1880 bis 2023 um ca. 1,8 °C gestiegen (DWD 2024) – etwa ein halbes Grad mehr als im globalen Durchschnitt (Lee et al. 2023). Es wäre zu erwarten, dass auch die Niederschlagsmengen zugenommen haben. Allerdings sind landesweite Trendanalysen von Starkregenereignissen erschwert, da diese oft kleinräumig auftreten und aufgrund der geringen Messnetzdichte nicht immer von Regenmessstationen erfasst werden. Seit der Jahrtausendwende gibt es zusätzlich flächendeckende Radardaten. Aufgrund der bisher kurzen Datenzeitspannen können

diese jedoch nur für Teilperioden des Untersuchungszeitraums genutzt werden und erlauben keine langjährigen, robusten Trendaussagen. (Becker et al. 2016)

Die Auswertung täglicher Niederschlagssummen in Deutschland für den Zeitraum von 1951 bis 2006 zeigt eine Zunahme der Niederschlagsmenge um 25 % in den Wintermonaten. Für die Sommermonate lassen sich keine klaren Trends identifizieren. Hier dominiert eine hohe Niederschlagsvariabilität, lediglich für die Südhälfte Deutschlands ist eine leichte Zunahme festzustellen. Diese Erkenntnisse werden von Murawski et al. (2016) untermauert. Für Niederschlagsereignisse mit Dauerstufen unter 24 h weisen die Radardaten regional auf eine Zunahme von Starkregen hin. Allerdings lässt sich aufgrund der kurzen Datenreihe von 15 Jahren kein eindeutiges Trendverhalten feststellen. Für gesicherte Aussagen bedarf es längerer Zeitreihen. (Becker et al. 2016)

Auf lokaler Ebene können bereits aussagekräftige Trendanalysen durchgeführt werden, wenn längere, hochaufgelöste Messreihen vorhanden sind: Bürger et al. (2021) zeigen anhand von Messdaten (Messreihen > 80 Jahre, zeitliche Auflösung ≤ 10 min) aus Stationen des Emscher-Lippe-Gebiets, dass eine Zunahme der extremen Niederschlagsintensitäten in der Größenordnung von 30 % pro Jahrhundert erkennbar ist, die sich durch die Erwärmung des regionalen Klimas erklären lässt. Dieser Trend ist auch in deutschen Nachbarländern zu beobachten, wie in derselben Studie für Stationen der schweizerischen und österreichischen Alpenregion gezeigt wird. Lenderink und van Meijgaard (2008, 2010) konnten ebenfalls für eine niederländische Station mit einer 100-jährigen Messreihe zeigen, dass die Intensität einstündiger Starkniederschläge mit steigenden Temperaturen zunimmt. Insbesondere bei den extremsten Ereignissen ist ab einer bestimmten Temperaturschwelle ein überproportionaler Anstieg der gemessenen Niederschlagsintensität zu beobachten (Super-Clausius-Clapeyron-Effekt). Die untersuchten Tagesniederschläge zeigen hingegen kein solches Verhalten. Der Weltklimarat kommt mit hoher Sicherheit zu dem Schluss, dass seit den 1950er-Jahren in den meisten Landgebieten mit ausreichend langen Beobachtungsreihen die Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen zugenommen hat (Lee et al. 2023). Für die Zukunft projizieren Bürger et al. (2021) in einer Klimasimulation für das 21. Jahrhundert eine ähnliche oder sogar stärkere Zunahme der extremen Niederschlagsintensitäten im Vergleich zu den letzten Jahrzehnten für Stationen des Emscher-Lippe-Gebiets.

2.2 Niederschlags-Abfluss-Modellierung

Mithilfe von Niederschlags-Abfluss-Modellen kann das Abflussgeschehen im Kanal und an der Oberfläche numerisch nachgebildet werden. Im Bereich der Siedlungsentwässerung werden sie zum Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen, zur Überflutungsberechnung an der Oberfläche sowie für Schmutzfrachtberechnungen genutzt (DWA 2021). Für die Abbildung der Abflussprozesse werden mathematische Modelle verwendet, die sich in datengetriebene (Black-

Box-), deterministische (White-Box-) und stochastische Modelle unterteilen lassen (Hürter 2018). Black-Box-Modelle beschreiben den abzubildenden Prozess auf Grundlage von Eingangs- und Ausgangsdaten, ohne dass dabei das innere Systemverhalten explizit dargestellt wird. Stochastische Modelle verwenden statistische Methoden für die Prozessabbildung. Deterministische Modelle basieren auf der Annahme einer physikalisch begründeten Ursache-Wirkung-Beziehung (Maniak 2016), ihr Systemverhalten wird durch die Lösung der zugehörigen Gleichungssysteme beschrieben. Die Modelltypen werden häufig in Kombination eingesetzt, um die verschiedenen Teilprozesse der Abflussmodellierung nachzubilden: Für die Abflussbildung und die Abflusskonzentration werden in der Regel Black-Box-Modelle eingesetzt, während für den Abflusstransport deterministische Modelle verwendet werden.

2.2.1 Grundlagen

Bei der Modellierung des Abflusses unterscheidet man zwischen den Teilprozessen Abflussbildung, Abflusskonzentration und Abflusstransport. Unter dem Begriff Abflussbildung werden die Vorgänge zusammengefasst, die bestimmen, welcher Anteil des gefallenen Niederschlags zum Abfluss gelangt (abflusswirksamer Niederschlag). Dazu gehören die Oberflächenbenetzung, die Muldenfüllung, die Verdunstung und die Versickerung. Die Abflusskonzentration beschreibt die Umwandlung des flächenhaften abflusswirksamen Niederschlags in eine Abflusswelle an einem Punkt (Übergabepunkt in den Kanal). Diese Abflusswelle bildet die Zuflussganglinie zum Kanalnetz, wo der weitere Transport durch den Abflusstransport abgebildet wird. (DWA 2021)

Berechnung der Abflussbildung

Grundsätzlich wird bei der Abflussbildung zwischen der vereinfachten und der detaillierten (gitternetzbezogenen) Berechnung unterschieden. Bei der vereinfachten Berechnung wird der abflusswirksame Niederschlag je Teilfläche oder je Einzugsgebiet bestimmt. Beim detaillierten Ansatz wird die Abflussbildung für jedes einzelne Gitternetzelement berechnet. (DWA 2021)

In Abbildung 2-1 ist der zeitliche Verlauf des Abflussbildungsprozesses mit seinen einzelnen Komponenten bei konstanter Niederschlagsintensität für eine unbefestigte Fläche dargestellt. Nach der Benetzung der Oberfläche beginnt die Versickerung und die Muldenfüllung, während die Verdunstung über die gesamte Niederschlagsdauer stattfindet. Für die weiteren Berechnungen ist der abflusswirksame Niederschlag (Oberflächenabfluss) die relevante Größe.

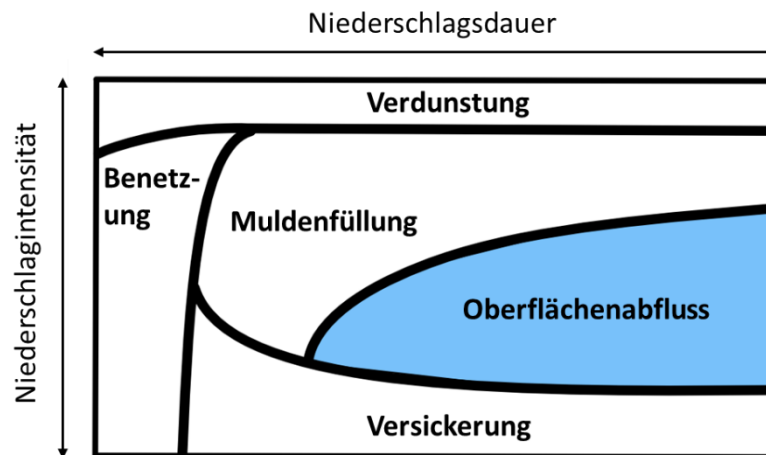


Abbildung 2-1: Verlauf des Abflussbildungsprozesses für eine unbefestigte Fläche (eigene Darstellung in Anlehnung an DWA-M 165-1 (DWA 2021))

Die Komponenten Benetzung und Muldenfüllung können vereinfacht als Anfangsverluste angesetzt werden. Dabei hängt die Niederschlagshöhe, die als Verlust berücksichtigt wird, von der Oberflächenbeschaffenheit, dem Bewuchs und dem Gefälle ab. Die Verdunstung wird als konstanter Dauerverlust berücksichtigt.

Die Abbildung der Versickerung ist komplexer, da sie sich im zeitlichen Verlauf des Niederschlagsereignisses verringert. Hier bietet sich die Modellierung mithilfe eines Verlustratenansatzes wie z. B. dem Horton-Ansatz an: (DWA 2021)

$$f(t) = f_e + (f_0 - f_e) \cdot e^{-k_R t} \quad (2-1)$$

mit:

$f(t)$ = Infiltrationsrate zum Zeitpunkt t [mm/h]

f_0 = Anfangsinfiltrationsrate [mm/h]

f_e = Endinfiltrationsrate [mm/h]

k_R = Rückgangskonstante [1/h]

Ausgehend von der Anfangsinfiltrationsrate wird die Infiltrationsrate für jeden Zeitschritt neu berechnet. Die Infiltrationsrate nimmt dabei in Abhängigkeit von der gewählten Rückgangskonstante ab, bis sie die Endinfiltrationsrate erreicht. Ein weiterer Verlustratenansatz zur Modellierung der Infiltration ist der Green-Ampt-Ansatz (siehe Kapitel 2.4).

Berechnung der Abflusskonzentration

Wie bei der Abflussbildung gibt es bei der Abflusskonzentration die Unterscheidung zwischen vereinfachter und detaillierter (gitternetzbezogener) Berechnung. Bei der vereinfachten Berechnung erfolgt die Bestimmung der Abflusskonzentration je Teilfläche oder Einzugsgebiet mithilfe von Übertragungsfunktionen. Bei der detaillierten

Berechnung wird die Abflusskonzentration für jedes Gitternetzelement mittels 2D-hydraulischer Ansätze ermittelt. (DWA 2021)

Ein häufig verwendeter Ansatz für die vereinfachte Berechnung ist das Einheitsganglinienverfahren, bei dem aus dem abflusswirksamen Niederschlag mithilfe von Übertragungsfunktionen eine Abflussganglinie ermittelt wird. Die Grundannahme ist, dass ein Einheitsniederschlag eine Einheitsganglinie erzeugt. Dabei wird von einer gleichmäßigen Überregnung des Einzugsgebiets sowie vom Prinzip der Linearität und Superposition ausgegangen. Unter Linearität versteht man, dass die Höhe des resultierenden Direktabflusses linear von der Höhe des abflusswirksamen Niederschlagsimpulses abhängt. Superposition bedeutet, dass mehrere Einheitsganglinien zusammengefasst werden können, um die Gesamtabflussganglinie zu erzeugen. Dabei setzt sich der Gesamtabfluss in jedem Zeitpunkt aus der Summe der Abflüsse der Einheitsganglinien zum jeweiligen Zeitpunkt zusammen. Die Form der Einheitsganglinie, die von den Gebieteigenschaften abhängt, lässt sich durch die Anwendung des Prinzips der linearen Speicherkaskade ermitteln. Dazu wird eine Anzahl n linearer Speicher mit gleichen Eigenschaften (Speicherkonstante k) hintereinandergeschaltet. Der abflusswirksame Niederschlag ist der Zufluss in den ersten Speicher, die zu ermittelnde Einheitsganglinie die Abflussganglinie aus dem letzten Speicher. Die Kenngrößen n und k bestimmen die Form der Einheitsganglinie und müssen aus den Gebietskenngrößen ermittelt werden (DWA 2021).

Eine weiterer vereinfachter Ansatz ist der Manning-Ansatz zur Berechnung des Abflusses auf einer schiefen Ebene: (DWA 2021)

$$Q = \frac{1}{n} \cdot I^{\frac{1}{2}} \cdot r_{hy}^{\frac{2}{3}} \cdot A_x \quad (2-2)$$

mit:

- $Q =$ Abfluss [m^3/s]
- $n =$ Rauheit nach Manning, abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit [$\text{s}/\text{m}^{1/3}$]
- $I =$ Gefälle [m/m]
- $r_{hy} =$ hydraulischer Radius [m]
- $A_x =$ durchströmte Querschnitt [$1/\text{h}$]

Bei der detaillierten, gitternetzbezogenen Berechnung der Abflusskonzentration wird der Abfluss auf der 2D-Oberfläche durch die Anwendung der Kontinuitäts- und Bewegungsgleichung berechnet (siehe Kapitel 2.2.3).

Berechnung des Abflusstransports

Hinsichtlich des Berechnungsansatzes für den Abflusstransport können die Modelle in 1D-, 2D-hydrodynamische Modelle und gekoppelte 1D/2D-hydrodynamische Modelle unterteilt werden (DWA 2024). Im Folgenden wird die Berechnung des Abflusstransports für die verschiedenen Modellarten beschrieben und ihr Anwendungsbereich genannt.

2.2.2 1D-hydrodynamische Modelle

1D-hydrodynamischen Modellen werden für den Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen angewendet. Der Abfluss in Entwässerungssystemen unterliegt großen Schwankungen: Während eines Starkregenereignisses ist die Abflusswelle um ein Vielfaches höher als im Trockenwetterfall. Die Modellierung der instationären (zeitlich variierenden) Abflusswelle im Kanal ist der wesentliche Bestandteil eines 1D-Modells (Butler et al. 2018). Dabei müssen die Effekte der Retention (Dämpfung der Abflusswelle) und Translation (Verschiebung der Abflusswelle) abgebildet werden. Die mathematische Beschreibung der Abflusswelle erfolgt mit den Saint-Venant-Gleichungen (DWA 2006):

Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (2-3)$$

Bewegungsgleichung:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{c_s}{g} \cdot \frac{v}{A} \cdot q + \frac{\partial h}{\partial x} = I_S - I_R \quad (2-4)$$

mit:

- Q = Durchfluss [m³/s]
- A = Fließquerschnitt normal zur Sohle [m²]
- v = mittlere Fließgeschwindigkeit im Querschnitt [m/s]
- c_s = Beiwert zur Berücksichtigung der seitlichen Zuströmung [-]
- h = Wassertiefe oder Druckhöhe normal zur Sohle [m]
- I_S = Sohlgefälle [m/m]
- I_R = Reibungsgefälle [m/m]
- g = Erdbeschleunigung [m/s²]

| | |
|-------|---|
| $x =$ | Wegkoordinate [m] |
| $t =$ | Zeitkoordinate [s] |
| $q =$ | seitlicher Zufluss [$\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$] |

Diese nichtlinearen, partiellen Differentialgleichungen müssen numerisch gelöst werden, um die unbekanntenen Größen Durchfluss Q , Fließgeschwindigkeit v und Wassertiefe h zu ermitteln, die von der Zeit t und dem Ort x abhängen. Die Differentialgleichungen lassen sich entweder durch explizite oder implizite Lösungsverfahren lösen.

Überstauberechnung

Überstau ist ein Belastungszustand der Kanalisation, bei dem der Wasserstand die Geländeoberkante überschreitet und Abwasser aus dem Kanal austritt (DWA 2024). Im Gegensatz zu hydrologischen Modellen können 1D-hydrodynamische Modelle Überstauereignisse abbilden, allerdings nicht die Fließwege auf der Oberfläche. Ein üblicher Ansatz zur Berücksichtigung des austretenden Abwassers ist die Verortung fiktiver Speicher über den Schächten. Diese füllen sich mit Beginn des Überstauereignisses und entleeren sich, sobald der Wasserstand im Schacht unter die Geländeoberkante fällt (DWA 2021).

2.2.3 2D-hydrodynamische Modelle

Im Gegensatz zu 1D-hydrodynamischen Modellen kann mit 2D-hydrodynamischen Modellen der Abfluss auf der Oberfläche in zwei horizontale Richtungen simuliert werden. Dabei wird der detaillierte Ansatz für den Abflussbildungs- und -transportprozess verwendet, bei dem die Oberfläche in Gitternetzelemente unterteilt und für jedes dieser Elemente der Abfluss und der Wasserstand berechnet wird. Die Modellvorstellung der Abflusskonzentration entfällt, da diese im Abflusstransportprozess berücksichtigt wird. Der Abflusstransport wird mit den zweidimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen (Flachwassergleichungen) berechnet (DWA 2024).

Voraussetzung für den Aufbau eines 2D-Modells ist ein digitales Geländemodell (DGM), mit dem die Topografie des Einzugsgebiets abgebildet wird. Außerdem werden georeferenzierte Informationen über die befestigten Flächen (Dachfläche, Straßenflächen sowie Hof- und Wegeflächen) benötigt. In einem reinen 2D-Modell wird das Kanalnetz nicht berücksichtigt, weshalb das Überflutungsgeschehen tendenziell überschätzt wird. Gleichzeitig sind aber auch die Datenanforderungen für den Modellaufbau geringer, weil das Kanalfinnetz nicht in digitaler Form vorliegen muss. Der Anwendungsbereich von 2D-Modellen liegt in der Untersuchung der Überflutungsfährdung von großen Einzugsgebieten und der Identifikation von Überflutungsschwerpunkten, die anschließend detaillierter mit einem 1D/2D-Modell betrachtet werden können.

Flachwassergleichungen

Die Flachwassergleichungen modellieren die zweidimensionale Strömung einer inkompressiblen Flüssigkeit mit freier Oberfläche. Sie werden aus den dreidimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen hergeleitet, indem diese über die Wassertiefe integriert werden. Voraussetzung für diese Herleitung ist, dass die horizontale Ausdehnung der Strömung deutlich größer ist als die Wassertiefe (DWA 2021). In der Kontinuitätsgleichung werden die Veränderung des Volumenstroms entlang der räumlichen Ausdehnung und die zeitliche Änderung der Wassertiefe berücksichtigt: (Aigner und Bollrich 2021)

Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (2-5)$$

Flachwassergleichung in x-Richtung:

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \cdot \frac{h^2}{2} - h \cdot \nu_T \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x \cdot q_y}{h} - h \cdot \nu_T \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + g \cdot h (I_{Rx} - I_{Sx}) = 0 \quad (2-6)$$

Flachwassergleichung in y-Richtung:

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

mit:

$$q_x = v_x \cdot h$$

$$q_y = v_y \cdot h$$

h = Wassertiefe [m]

t = Zeit [s]

q_x = Durchfluss in x-Richtung (pro Breite) [m²/s]

v_x = Fließgeschwindigkeit in x-Richtung [m/s]

q_y = Durchfluss in y-Richtung (pro Breite) [m²/s]

v_y = Fließgeschwindigkeit in y-Richtung [m/s]

g = Erdbeschleunigung [m/s²]

ν_T = Viskosität [m²/s]

I_R = Reibungsgefälle in x- oder y-Richtung [m/m]

I_S = Sohlgefälle in x- oder y-Richtung [m/m]

Diffusionswellenansatz und kinematischer Wellenansatz

Der Diffusionswellenansatz und der kinematische Wellenansatz sind Vereinfachungen der Flachwassergleichungen. Beim Diffusionswellenansatz wird die zeitliche und räumliche Ableitung der Geschwindigkeit $\frac{\partial \bar{v}}{\partial t}$ und $\bar{v} \cdot \nabla \bar{v}$ (Trägheitsterm) in der Impulsgleichung vernachlässigt. Durch Verwendung der Manning-Strickler Gleichung erhält man folgende Lösung für den Geschwindigkeitsvektor: (DWA 2021)

$$\bar{v} = -\frac{1}{n} \cdot h^{2/3} \sqrt{\nabla(h+z)} \frac{\nabla(h+z)}{|\nabla(h+z)|} \quad (2-7)$$

mit:

- \bar{v} = 2-dimensionaler Geschwindigkeitsvektor mit den horizontalen Komponenten in x- und y-Richtung [m/s]
- n = Rauheit nach Manning, abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit [s/m^{1/3}]
- z = Geländehöhe [m]
- ∇ = Nabla-Operator, partielle Ableitung in x- und y- Richtung

Diese Gleichung kann weiter durch den kinematischen Wellenansatz vereinfacht werden, bei dem zusätzlich der Druckterm $g \cdot \nabla h$ unberücksichtigt bleibt. So wird die Strömung nur noch durch das Geländegefälle bestimmt und nicht mehr durch das Gefälle des Wasserspiegels. Der Geschwindigkeitsvektor berechnet sich folgendermaßen:

$$\bar{v} = -\frac{1}{n} \cdot h^{2/3} \sqrt{\nabla z} \frac{\nabla z}{|z|} \quad (2-8)$$

Lösungsverfahren

Die Flachwassergleichungen und deren Vereinfachungen können mit Finite-Differenzen-, Finite-Elemente- und Finite-Volumen-Verfahren gelöst werden. Meist wird das Finite-Volumen-Verfahren angewandt, da es sich besonders für die Lösung der Massenerhaltungsgleichung eignet. Für die Anwendung muss das Untersuchungsgebiet in Gitternetzelemente aufgeteilt werden, in denen verschiedene hydrodynamische Größen (Geschwindigkeit, Wasserstand, Druck) berechnet werden. (DWA 2021)

2.2.4 Gekoppelte 1D/2D-hydrodynamische Modelle

Bei gekoppelten 1D/2D-Modellen werden die 1D-Ansätze (Kapitel 2.2.2) und die 2D-Ansätze (Kapitel 2.2.3) in zwei miteinander kommunizierenden Teilmodellen abgebildet. So kann das Überflutungsgeschehen auf der Oberfläche im Zusammenhang mit dem Abfluss im Kanalnetz modelliert werden. Der hydraulische Austausch zwischen

Oberfläche und Kanal wird über Schächte und Straßenabläufe als Kopplungspunkte zwischen den beiden Teilmodellen berücksichtigt. Wenn der Austausch in beide Richtungen abgebildet wird, also wenn Wasser von der Oberfläche in das Kanalnetz und auch aus dem Kanal auf die Oberfläche fließen kann, spricht man von einer bidirektionalen Kopplung. Bei der Modellierung der Abflussbildung und -konzentration beziehungsweise des Abflusstransports an der Oberfläche können je nach Teilfläche unterschiedliche Ansätze gewählt werden: Beispielsweise kann der abflusswirksame Niederschlag von Dachflächen dem Kanalnetzmodell punktuell zugegeben werden, um die Anbindung der Dachfläche über ein Fallrohr und eine Anschlussleitung an den Hauptkanal abzubilden. Bei Straßenflächen ist es realitätsnäher, den Abflussbildungs- und -transportprozess direkt im 2D-Oberflächenmodell zu modellieren (direkte Beregnung). Die Möglichkeit, unterschiedliche Modellierungsansätze zu wählen, hängt im Wesentlichen von der Funktionalität der eingesetzten Simulationssoftware ab (Hürter 2018). Bidirektional gekoppelten 1D/2D-Modelle ermöglichen eine gemeinsame realitätsnahe Abbildung der Systeme Kanal und Oberfläche, allerdings setzt ihr Aufbau eine hohe Datenverfügbarkeit (Kanalnetz in digitaler Form, Geodaten, etc.) und Modellierungserfahrung voraus. Ihr Anwendungsbereich ist die Überflutungsprüfung und Erstellung von Starkregengefahren- oder -risikokarten.

2.3 Regenwasserbewirtschaftung im Kontext Starkregen

Der Begriff Regenwasserbewirtschaftung beschreibt Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit Niederschlagswasser. Ziel ist es, das anfallende Niederschlagswasser nicht gesammelt abzuleiten, sondern nach Möglichkeit zu versickern, zwischenzuspeichern, zu nutzen und bei Verschmutzung zu behandeln. Neben der Entwässerungssicherheit werden bei diesem modernen Regenwassermanagement u.a. folgende Ziele verfolgt: Eine möglichst geringe Beeinträchtigung des lokalen Wasserhaushaltes durch Versickerung und Verdunstung statt Ableitung, die Reduzierung von Stoffeinträgen in Gewässer, Kühlungseffekte bei Hitzestress durch Verdunstung sowie positive ökologische Effekte (UBA 2024). Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch nur die Entwässerungssicherheit unter dem Aspekt des Überflutungsschutzes bei Starkregen betrachtet.

Zur Umsetzung der zuvor beschriebenen Konzepte werden als technische Maßnahmen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen (RWBA) eingesetzt. Dabei wird zwischen dezentralen und zentralen Anlagen unterschieden. Zentrale Anlagen sind in das Entwässerungssystem integriert und für die Bewirtschaftung des Niederschlagsabflusses größerer Gebiete ausgelegt. Ein Beispiel dafür ist ein Regenrückhaltebecken, an das ein Teileinzugsgebiet angeschlossen ist. Dezentrale RWBA sind kleinere, lokale Maßnahmen zur Bewirtschaftung des Niederschlagsabflusses von einzelnen Gebäuden oder Grundstücken. Beispiele sind Mulden, Gründächer und Zisternen. Sie werden

am Entstehungsort des Niederschlagsabflusses eingesetzt, bevor dieser der Kanalisation zufließt. Dadurch lässt sich das Entwässerungssystem flexibel ergänzen, ohne dass bauliche Veränderungen am bestehenden Kanalnetz erforderlich sind. Die Anlagen sind über das Einzugsgebiet verteilt und können standortabhängig angepasst werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden dezentrale RWBA untersucht, zentrale Anlagen bleiben unberücksichtigt. Im Text werden die dezentralen RWBA nur als RWBA bezeichnet.

Die Planungskonzepte und Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung sind international etabliert und werden unter anderem als *Green Infrastructure (GI)*, *Low Impact Development (LID)*, *Water Sensitive Urban Design (WSUD)*, *Best Management Practices (BMP)* und *Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)* bezeichnet (Fletcher et al. 2015). Zwar unterscheiden sich die Bemessungsvorgaben der nationalen Regelwerke, die Bemessung auf Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten $T > 10$ a ist aber in der Regel nicht vorgesehen. So werden beispielsweise Versickerungsanlagen in den USA, Großbritannien und der Schweiz auf eine Jährlichkeit $T = 10$ a bemessen, in Deutschland üblicherweise auf $T = 5$ a und in der Schweiz auf $T = 2$ a (Schneider et al. 2017). Dies unterstreicht den Forschungsbedarf hinsichtlich des Effekts von erweiterten Versickerungsanlagen zur Überflutungsminderung. Neben der Dimensionierung auf einzelne Starkregenereignisse gibt es in den USA den Bemessungsansatz, bei dem die Anlagen auf die Wasserbilanz hin dimensioniert werden. Ziel ist dabei die Versickerung von bis zu 90 % des mittleren jährlichen Oberflächenabflusses (Schneider et al. 2017).

Die in dieser Arbeit untersuchten RWBA sind in Abbildung 2-2 dargestellt. Insgesamt werden 14 verschiedene Anlagen untersucht, die sich in Versickerungsanlagen, Gründächer, Zisternen und modifizierte Straßenbäume untergliedern lassen. Die Versickerungsanlagen umfassen Mulden, Rigolen und Mulden-Rigolen-Elemente, die jeweils auf $T = 5$ a und 100 a dimensioniert werden. Bei den Gründächern werden extensive und intensive Gründächer sowie Retentionsdächer untersucht. Die Zisternentypen umfassen herkömmliche Zisternen sowie ungedrosselte und gedrosselte Retentionszisternen. Bei den modifizierten Straßenbäumen wird zwischen dem hydrologisch optimierten Baumstandort (HOB) und der Baumrigole unterschieden. Im Folgenden werden die Anlagen beschrieben und die zugehörigen Bemessungsverfahren (sofern vorhanden) aus den jeweiligen deutschen technischen Regelwerken genannt.

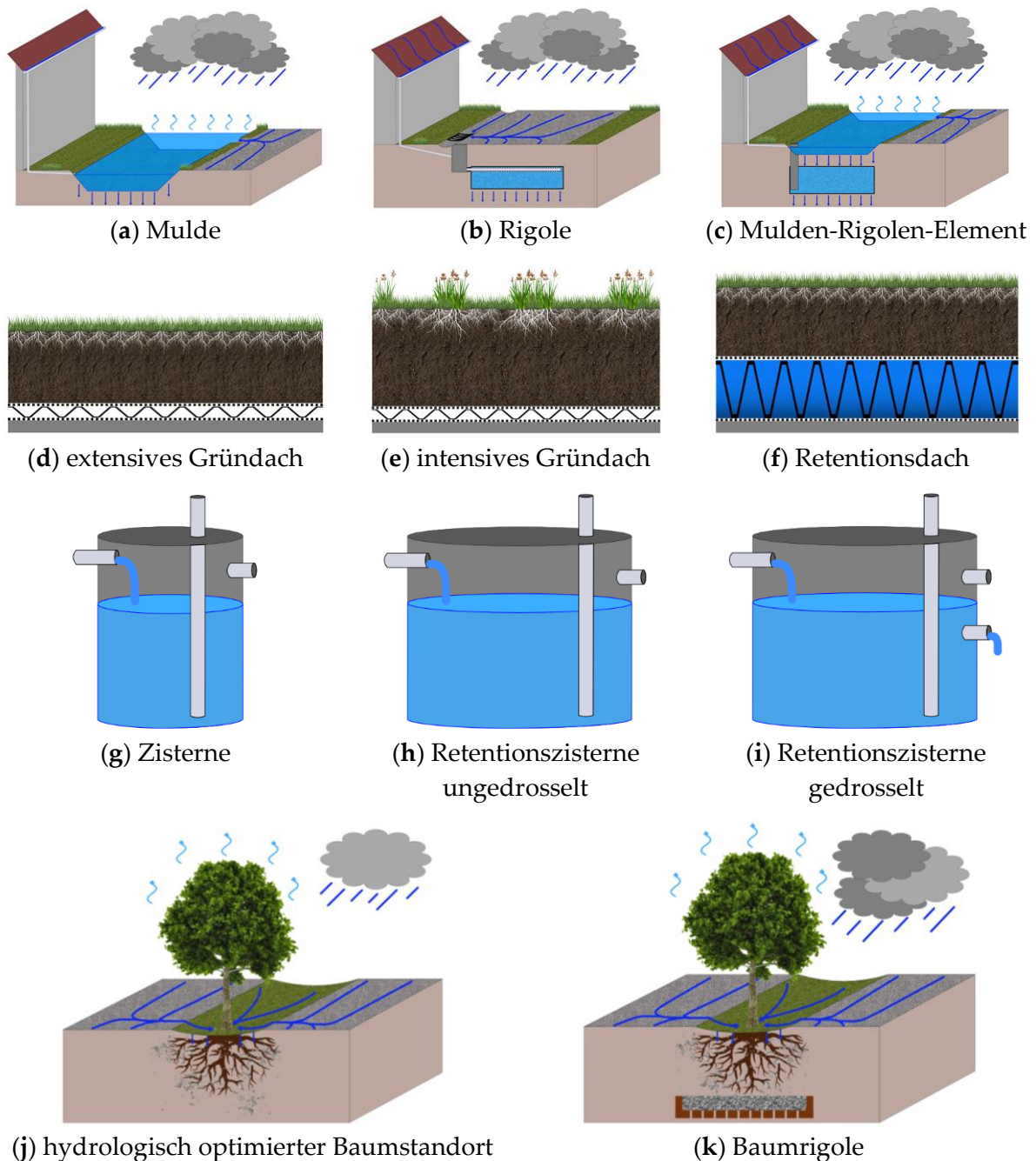


Abbildung 2-2: Untersuchte RWBA. Versickerungsanlagen: (a), (b), (c); Gründächer: (d), (e), (f); Zisternentypen: (g), (h), (i); modifizierte Straßenbäume: (j), (k)

2.3.1 Versickerungsanlagen

Dezentrale Versickerungsanlagen werden in unmittelbarer Nähe zu den entwässerten Flächen angeordnet. Die Vorgaben zu ihrer Planung und Bemessung sind im Arbeitsblatt DWA-A 138-1 „Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser – Teil 1: Planung, Bau, Betrieb“ (DWA 2024) festgelegt. Die rechtliche Grundlage für ihren Einsatz ist im § 55 Abs. 2 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) verankert: „Niederschlagswasser soll ortsnahe versickert, verrieselt oder direkt oder über eine Kanalisation ohne

Vermischung mit Schmutzwasser in ein Gewässer eingeleitet werden, soweit dem weder wasserrechtliche noch sonstige öffentlich-rechtliche Vorschriften noch wasserwirtschaftliche Belange entgegenstehen“. Des Weiteren ist im Arbeitsblatt DWA-A 100 „Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung“ (ISiE) die Zielsetzung festgelegt, Änderungen des natürlichen Wasserhaushalts durch Siedlungsaktivitäten möglichst gering zu halten (DWA 2006). Unter diesen Rahmenbedingungen sollte Niederschlagswasser ortsnah versickert und so am Ursprungsort in den Wasserkreislauf zurückgeführt werden, sofern die Randbedingungen – wie z. B. die Versickerungsfähigkeit des Bodens oder die stoffliche Belastung des Niederschlagsabflusses – dies zulassen.

Hinsichtlich Starkregen wird die Bemessungshäufigkeit der Anlage in Abhängigkeit des Schadenspotenzials und den resultierenden Beeinträchtigungen im Versagensfall festgelegt (siehe Tabelle 8 DWA-A 138-1). In der Praxis werden die Anlagen meist auf eine Jährlichkeit von $T = 5$ a bemessen. Für die festgelegte Bemessungshäufigkeit darf kein Überlauf aus der Versickerungsanlage auftreten. Die Beeinträchtigungen im Versagensfall hängen von den Gebäuden, Fließwegen und der überfluteten Fläche im Bereich der Anlage ab. Bei innerörtlichen Grundstücken mit einer abflusswirksamen Fläche $AC > 800 \text{ m}^2$ muss zusätzlich ein Überflutungsnachweis nach DIN 1986-100 erbracht werden. (DWA 2024)

Die Bemessung von Versickerungsanlagen kann mit dem Einfachen Verfahren oder dem Nachweisverfahren durchgeführt werden. Beim Einfachen Verfahren erfolgt die Bemessung auf Basis einer statistischen Niederschlagsauswertung, beim Nachweisverfahren mittels einer Niederschlag-Abfluss-Langzeitsimulation. Als Voraussetzung für die Anwendung des Einfachen Verfahrens müssen nach DWA-A 138-1 (DWA 2024) folgende Bedingungen eingehalten werden:

- Größe des an die Versickerungsanlage angeschlossenen Einzugsgebiets 200 ha , oder Fließzeit zur Versickerungsanlage $\leq 15 \text{ min}$
- Bemessung erfolgt auf eine Jährlichkeit $\leq 10 \text{ a}$
- Regenhäufigkeit wird mit der Bemessungshäufigkeit gleichgesetzt
- Spezifische Versickerungsleistung bezogen auf die abflusswirksame angeschlossene Fläche ist $\leq 2 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$

Das Nachweisverfahren wird für zentrale Versickerungsanlagen, aber auch für komplexere Systeme von dezentralen Anlagen verwendet, wenn z. B. Mulden-Rigolen-Systeme in Reihe und Sickerschachtkaskaden eingesetzt werden (DWA 2024). In dieser Arbeit wird das Einfache Verfahren für die Vordimensionierung der Anlagen verwendet. Das Vorgehen bei der Bemessung und die zugehörigen Gleichungen sind in Anhang A1 beschrieben.

2.3.1.1 Versickerungsmulde

Eine Versickerungsmulde ist eine flache Vertiefung im Boden, in der Niederschlagsabfluss von befestigten Flächen kurzzeitig gespeichert und versickert wird. Im Regelwerk DWA-A 138-1 (DWA 2024) ist festgelegt, dass die Versickerung über eine bewachsene Bodenzone mit einer Mindestdicke von 20 cm erfolgen muss. Außerdem ist die maximale Einstauhöhe der Mulde in der Regel auf 30 cm zu begrenzen. Abbildung 2-3 zeigt die Prinzipskizze einer Versickerungsmulde, an die eine Dachfläche und ein befestigter Weg angeschlossen sind. Der Bemessungsvorgang ist in Anhang A2 beschrieben.



Abbildung 2-3: Versickerungsmulde

2.3.1.2 Rigole

Eine Rigole ist ein unterirdischer Stauraum, in dem Wasser zwischengespeichert und in den Untergrund versickert wird. Der Rigolenkörper kann aus Kies oder Kunststofffüllkörpern hergestellt werden. Entscheidend für die Speicherkapazität ist der Porenraum der Kiesschüttung oder das vorhandene Speichervolumen des Kunststofffüllkörpers. Die Rigolenversickerung wird insbesondere dann eingesetzt, wenn an der Oberfläche nicht ausreichend Platz für eine Muldenversickerung vorhanden ist (DWA 2024). Abbildung 2-4 zeigt die Prinzipskizze einer Rigole, der vorbehandelter Niederschlagsabfluss von einer Dachfläche und einem befestigten Weg zugeführt wird. Der Bemessungsvorgang ist in Anhang A3 beschrieben.

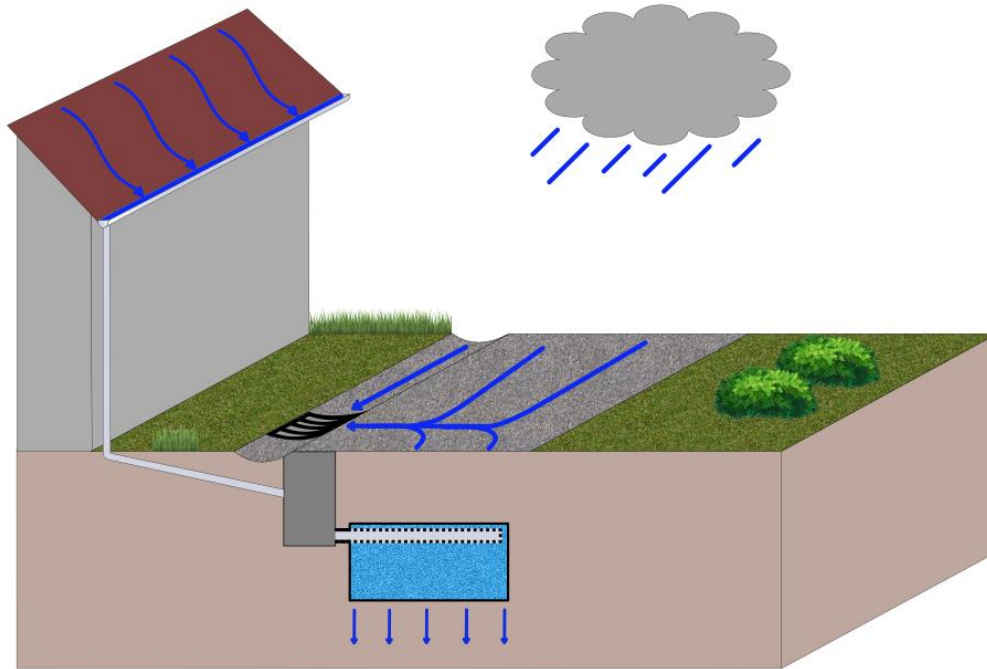


Abbildung 2-4: Rigole

2.3.1.3 Mulden-Rigolen-Element

Bei einem Mulden-Rigolen-Element (MRE) wird eine Versickerungsmulde mit einer unterirdischen Rigole kombiniert. Es ist sinnvoll, die Rigole über einen Muldenüberlauf mit der Mulde zu verbinden: Bei Regen staut sich die Mulde bis zur Höhe des Muldenüberlaufs ein. Weiteres Niederschlagswasser wird über ein Rohr in den Rigolenkörper eingeleitet, wo zusätzlicher Stauraum zur Verfügung steht, und versickert von dort in den Untergrund. Mulden-Rigolen-Elemente zeichnen sich durch ihren geringeren Platzbedarf an der Oberfläche aus (im Vergleich zu Versickerungsmulden) und dadurch, dass sie auch bei gering versickerungsfähigen Böden eingesetzt werden können (DWA 2024). Abbildung 2-5 zeigt die Prinzipskizze eines Mulden-Rigolen-Elements, an das eine Dachfläche und ein befestigter Weg angeschlossen sind. Der Bemessungsvorgang ist in Anhang A4 beschrieben.

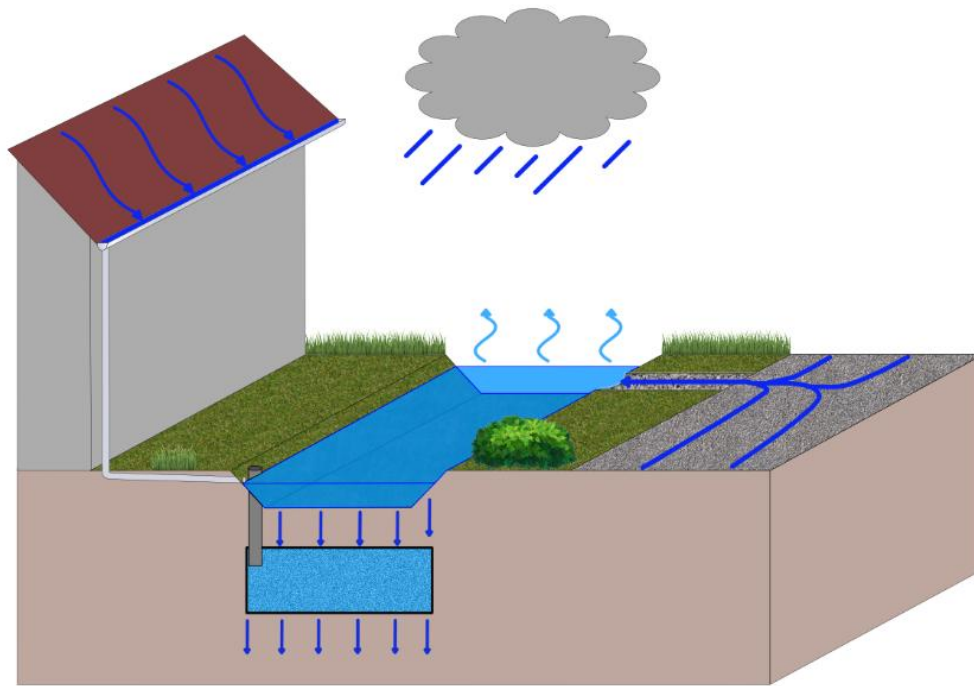


Abbildung 2-5: Mulden-Rigolen-Element

2.3.2 Gründächer

Gründächer sind Dachflächen, die mit einer Substratschicht bedeckt sind, auf der Vegetation wächst. Abhängig von der Nutzung und Bauweise unterscheidet man zwischen extensiver und intensiver Begrünung. Die Richtlinien zu ihrer Planung sind für Deutschland in den Dachbegrünungsrichtlinien „Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen“ (FLL 2018) festgelegt. Wesentliche hydrologische Wirkungen von Gründächern sind die Verringerung und Verzögerung des Niederschlagsabflusses durch Speicherung in der Substratschicht und Ableitung von überschüssigem Wasser in der Dränschicht. Außerdem fördern sie die Verdunstung (Evaporation) und Transpiration der Pflanzen. Sie haben einen positiven Effekt auf den lokalen Wasserhaushalt, der sich nach den Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung möglichst an den natürlichen lokalen Wasserhaushalt orientieren soll (DWA 2006).

Obwohl die wesentliche Wirkung von Gründächern der Rückhalt des Niederschlagsabflusses ist, werden sie normalerweise nicht für bestimmte Auftretenswahrscheinlichkeiten von Starkregen bemessen. In den Dachbegrünungsrichtlinien (FLL 2018) sind Spitzenabflussbeiwerte für verschiedene Schichtaufbauten und einen 15-minütigen Bemessungsregen ($r_{(15)} = 300 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$) gegeben, was einer Jährlichkeit zwischen $T = 30 - 50 \text{ a}$ entspricht. Dies zeigt den Forschungsbedarf, verschiedenen Gründachtypen eine Bemessungsjährlichkeit auf Basis des Vergleichs mit Versickerungsanlagen zuzuordnen und ihren Effekt auf die Überflutungsminderung bei außergewöhnlichen und extremen Starkregenereignissen mit Jährlichkeiten von $T \geq 100 \text{ a}$ zu untersuchen.

2.3.2.1 Extensives Gründach

Extensive Gründächer sind mit niedrigwüchsigen, pflegearmen Pflanzen wie Moosen, Flechten und Sedum-Arten auf einer geringen Substratschicht bewachsen. Die Vegetation ist selbsterhaltend, der Aufwand für Herstellung und Unterhaltung vergleichsweise gering. Die Aufbaudicke ist im Wesentlichen abhängig von der Dachbauweise und der angestrebten Begrünungsart. Die Spannweite der Aufbaudicke reicht bei Extensivbegrünung von 4 cm (Moos-Sedum-Begrünung) bis hin zu 20 cm (Gras-Kraut-Begrünung). In Abbildung 2-6 ist ein einschichtiges extensives Gründach dargestellt. Der Großteil der Aufbaudicke wird von der Vegetationstragschicht (Substratschicht) eingenommen, auf der die Vegetation gepflanzt ist. Sie muss gut durchwurzelbar sein, ein ausreichendes Luftvolumen aufweisen und das einsickernde Wasser pflanzenverfügbar speichern können. Die Bezeichnung einschichtig bedeutet, dass die Dränfunktion von der Vegetationsschicht übernommen wird und keine separate Dränschicht vorhanden ist. Die Mindestneigung der Dachfläche beträgt 2 %, um Wasseranstau zu vermeiden. Mit zunehmender Dachneigung müssen Maßnahmen gegen Abrutschen der Vegetations- und Substratschicht ergriffen werden, die maximal mögliche Neigung beträgt 100 %. (FLL 2018)



Abbildung 2-6: Einschichtiges extensives Gründach (Quelle: Paul Bauder GmbH & Co. KG, Gründach-Aufbau BauderGREEN Extensiv Sedumdach einfach¹)

2.3.2.2 Intensives Gründach

Im Gegensatz zu extensiven Gründächern kann die intensive Begrünung mit einem nutzbaren Garten verglichen werden, bei dem neben einfachem Rasen auch Zierpflanzen, Stauden und sogar Bäume angepflanzt werden können. Die Substratschicht muss dicker sein und auch der Pflegeaufwand ist deutlich höher, da die Vegetation eine re-

¹ <https://www.bauder.de/de/bauder-gruendach/systeme/baudergreen-extensiv/baudergreen-extensiv-sedumdach-einfach.html>

regelmäßige Wasser- und Nährstoffversorgung benötigt. Die Aufbaudicke einer Intensivbegrünung reicht von 12 cm (Rasen) bis zu 2 m (hohe Bäume). Abbildung 2-7 zeigt ein mehrschichtiges intensives Gründach. Mehrschichtig bedeutet, dass eine getrennte Vegetationstragschicht und Dränschicht vorhanden sind, die durch ein Filtervlies abgegrenzt werden. Durch die dickere Vegetationstragschicht und das daraus resultierende größere Gewicht ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Tragfähigkeit der Dachkonstruktion. Allerdings kann in der dickeren Vegetationstragschicht mehr Niederschlagswasser zurückgehalten werden. Wie bei extensiven Gründächern beträgt die Mindestneigung der Dachfläche 2 %, um Wasseranstau zu vermeiden. Mit zunehmender Dachneigung müssen Maßnahmen gegen Abrutschen der verschiedenen Schichten ergriffen werden, die maximal mögliche Neigung beträgt 100 %. (FLL 2018)

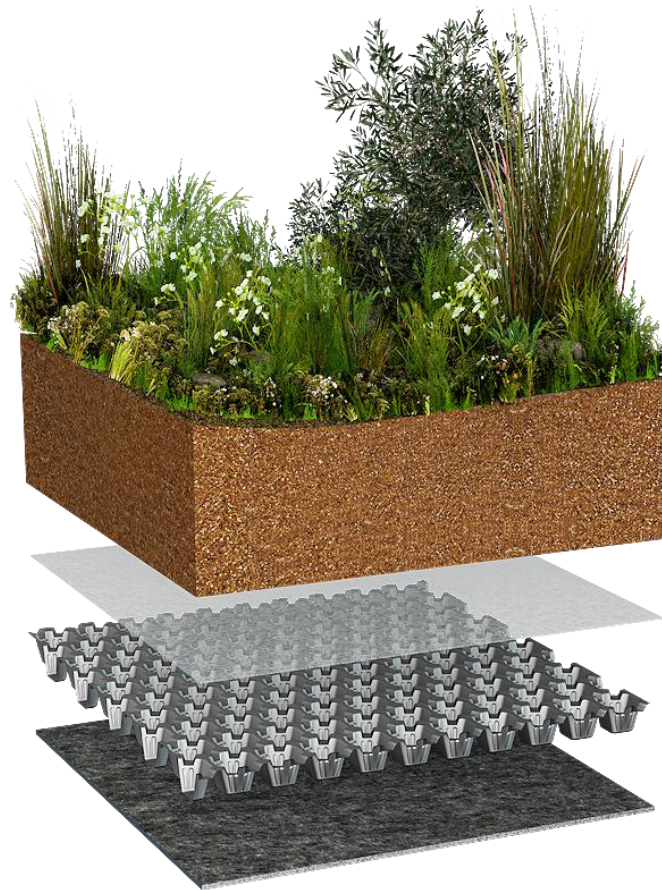


Abbildung 2-7: Mehrschichtiges intensives Gründach (Quelle: Paul Bauder GmbH & Co. KG, Gründach-Aufbau BauderGREEN Intensiv Dachgarten Stauden²)

2.3.2.3 Retentionsdach

In Bezug auf die Begrünungsart kann ein Retentionsdach mit einer extensiven oder intensiven Begrünung ausgeführt werden. Die Besonderheit ist die Retentionsschicht,

² <https://www.bauder.de/de/bauder-gruendach/systeme/baudergreen-intensiv/baudergreen-intensiv-dachgarten-stauden.html>

die eingestaut werden kann und zusätzliches Retentionsvolumen bietet. Bei der Planung von Retentionsdächern ist zu beachten, dass diese eine Abweichung von der üblichen Entwässerung darstellen (FLL 2018). Die Retentionsschicht wird unter der Vegetationstragschicht angeordnet und kann aus einer einfachen Kiesschicht oder aus Rigolenelementen bestehen. In Abbildung 2-8 ist ein Retentionsdach mit Kunststoff-Rigolenelementen dargestellt. Das Rückhaltevolumen wird durch die Höhe der Retentionsschicht und den zugehörigen Speicherkoeffizienten s_R bestimmt: Bei einer 100 mm dicken Retentionsschicht aus Kunststoff-Rigolenelementen mit einem Speicherkoeffizienten $s_R = 0,9$ können 90 mm Niederschlag in der Schicht zurückgehalten werden. Am Boden der Retentionsschicht muss eine Ablaufdrossel vorgesehen werden, damit es zu keinem dauerhaften Einstau kommt. Aufgrund der vorhandenen Ablaufdrossel gibt es keine Anforderungen an die Mindestneigung der Dachfläche. Die maximal mögliche Dachneigung liegt bei ca. 9 %.

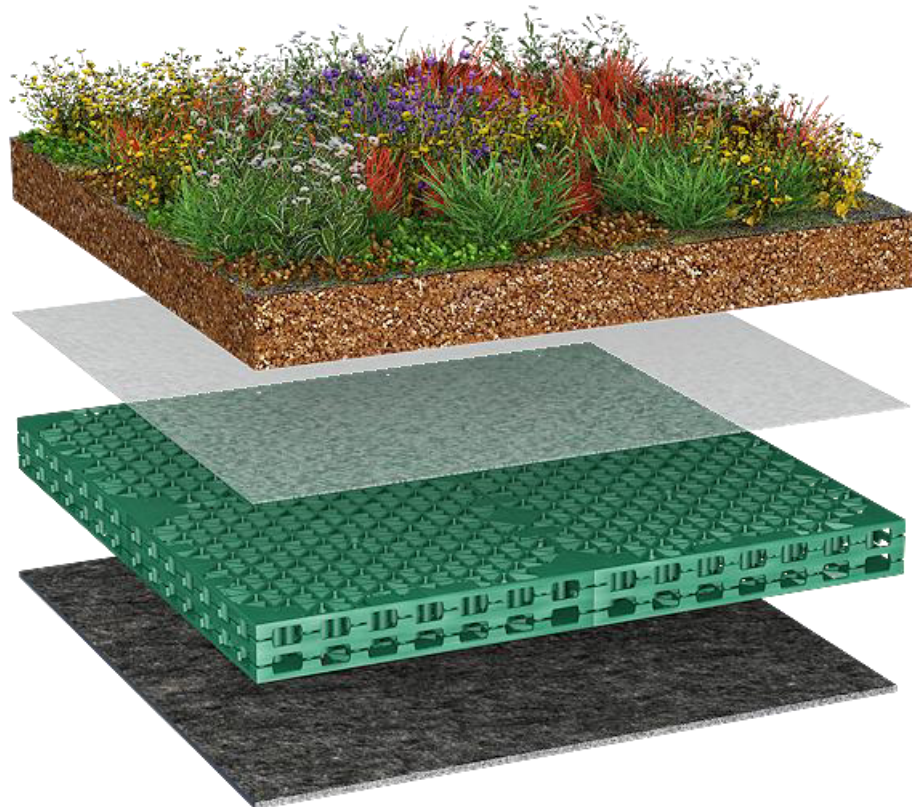


Abbildung 2-8: Retentionsdach mit Kunststoff-Rigolenelementen (Quelle: Paul Bauder GmbH & Co. KG, Gründach-Aufbau BauderGREEN Retention System Drossel³)

³ <https://www.bauder.de/de/bauder-gruendach/systeme/baudergreen-retentionsdach/baudergreen-retention-system-drossel.html>

2.3.3 Zisternentypen

Eine Zisterne ist ein fest installierter Behälter zur Speicherung von Wasser. In Bezug auf die Regenwasserbewirtschaftung dient sie zur Speicherung des Niederschlagsabflusses von Dachflächen, der z. B. zur Bewässerung von Pflanzen oder für die Toilettenspülung genutzt werden kann. Die Vorgaben zu ihrer Planung und Bemessung sind in der DIN EN 16941-1 „Vor-Ort-Anlagen für Nicht-Trinkwasser – Teil 1: Anlagen für die Verwendung von Regenwasser“ (DIN EN 2024) festgelegt. Die Regenwassernutzung unterstützt den nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser, da ein Teil des benötigten Trinkwassers ersetzt werden kann. Wird das gespeicherte Regenwasser zur Bewässerung von Pflanzen genutzt, fördert es die Evapotranspiration und Versickerung im lokalen Wasserhaushalt, wodurch eine Annäherung an den natürlichen Wasserhaushalt erreicht wird. Dies stellt eine zentrale Zielsetzung der integralen Siedlungsentwässerung dar (DWA 2006).

Im Starkregenfall sollte eine Zisterne möglichst leer sein, damit sie den Niederschlagsabfluss der angeschlossenen Dachfläche aufnehmen und speichern kann. Allerdings ist die primäre Funktion von Zisternen die Bereitstellung von Wasser im Bedarfsfall, weshalb diese möglichst gefüllt sein sollten. Um diesen Zielkonflikt aufzulösen, können Retentionszisternen eingesetzt werden, die neben dem Nutzvolumen zusätzlich ein Retentionsvolumen für den Rückhalt von Starkregen enthalten. Im Folgenden wird die Bemessung und der Aufbau von Zisternen sowie ungedrosselten und gedrosselten Retentionszisternen beschrieben.

2.3.3.1 Zisterne

Eine Zisterne besteht aus einem Speicherbehälter, einem Zulauf, einer Entnahmeeinrichtung und einem Überlauf. Abbildung 2-9 zeigt die Prinzipskizze einer Zisterne, bei der die Entnahme über ein Rohr erfolgt, an das eine Pumpe angeschlossen wird. Alternativ kann das Wasser über einen am Boden der Zisterne angeordneten Ablauf entnommen werden.

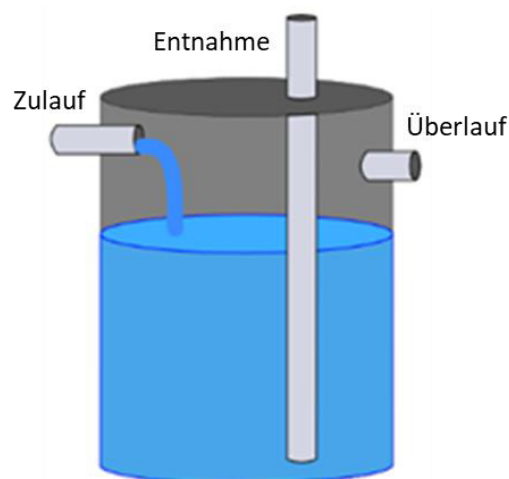


Abbildung 2-9: Zisterne mit Entnahmerohr

Die Bemessung von Zisternen kann gemäß DIN EN 16941-1 (DIN EN 2024) grundsätzlich nach dem vereinfachten Ansatz oder dem detaillierten Ansatz durchgeführt werden. Der detaillierte Ansatz ist für komplexe Vorhaben mit unregelmäßigem Bedarf und Ertrag auf Basis eines täglichen Zeitschritts. Der vereinfachte Ansatz wird bei Projekten mit regelmäßigem Ertrag und Bedarf auf Basis eines jährlichen Zeitabschnitts angewendet, wobei die Trockentage bis zum nächsten wahrscheinlichen Niederschlag berücksichtigt werden. Die Speicherkapazität der Zisterne sollte dabei entweder auf den jährlichen Regenwasserertrag oder den jährlichen Wasserbedarf ausgelegt werden, je nachdem welcher Wert kleiner ist. In dieser Arbeit erfolgt die Bemessung der Zisterne nach dem vereinfachten Ansatz mit jährlichem Zeitschritt, wobei die Speicherkapazität auf den jährlichen Regenwasserertrag ausgelegt wird. Die Bemessungsgleichungen sind in Anhang A5 gegeben.

2.3.3.2 Retentionszisterne

Neben dem Nutzvolumen wird bei einer Retentionszisterne noch ein Retentionsvolumen vorgesehen, das nur dem Rückhalt bei Starkregen gewidmet ist. Für die Bemessung des Retentionsvolumens gibt es keine einheitlichen Vorgaben, in dieser Arbeit wird es auf den vollständigen Rückhalt des 5 jährlichen Starkregens ($D = 60 \text{ min}$, $h_N = 25 \text{ mm}$) dimensioniert. Die Bemessungsgleichungen sind in Anhang A6 gegeben. Abbildung 2-10 zeigt die Prinzipskizzen zweier Retentionszisternen, wobei die eine ungedrosselt und die andere gedrosselt ausgeführt ist. Die ungedrosselte Variante ist, mit Ausnahme des größeren Volumens, baulich identisch zur herkömmlichen Zisterne. Bei der gedrosselten Variante wird zusätzlich ein Drosselorgan über dem Nutzvolumen angeordnet, damit sich der Retentionsraum durch einen eingestellten Drosselabfluss entleeren kann.

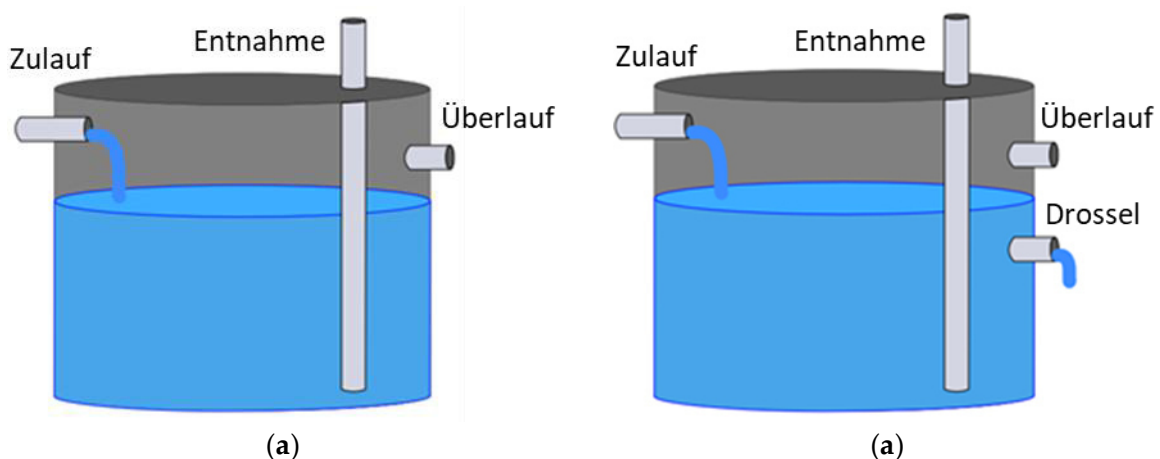


Abbildung 2-10: Retentionszisternen, (a) ungedrosselte Variante und (b) gedrosselt Variante

2.3.4 Modifizierte Straßenbäume

Im Rahmen dieser Arbeit bezeichnet modifizierter Straßenbaum einen Straßenbaum, der als hydrologisch optimierter Baumstandort (HOB) oder als Baumrigole ausgeführt wird (BlueGreenStreets 2022). Diesen Anlagen wird gezielt der Niederschlagsabfluss von umliegenden Straßen- und Wegeflächen zugeleitet. Dieser versickert, wird im Bodensubstrat sowie der Rigole zwischengespeichert und dient anschließend dem Baum als Bewässerungswasser. Bei stofflich belasteten Flächen (z. B. stark befahrene Verkehrsflächen) müssen die Niederschlagsabflüsse vorgereinigt werden. Die Vorgaben dazu sind im DWA Arbeitsblatt 138-1 (DWA 2024) festgelegt. Für die Planung von modifizierten Straßenbäumen gibt es keine einheitlichen Regelungen und sie werden nicht nach Auftretenswahrscheinlichkeiten von Starkregen oder anderen wasserwirtschaftlichen Kriterien bemessen. Allerdings lassen sich Vorgaben für die einzelnen Systemkomponenten aus den FLL-Richtlinien „Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 1 und 2“ (FLL 2015 und FLL 2010) sowie dem DWA Arbeitsblatt 138-1 (DWA 2024) ableiten. Modifizierte Straßenbäume fördern durch die erhöhte Evapotranspiration eine Annäherung an den natürlichen lokalen Wasserhaushalt, was eine Zielsetzung der integralen Siedlungsentwässerung ist (DWA 2006).

Bei Starkregen kommt es in der Baumkrone zu Anfangsverlusten durch Interzeption des Niederschlags, allerdings hängt der wesentliche Retentionseffekt von der Wasseraufnahmekapazität des Bodens und dem Speicherkoeffizienten der eingebauten Rigole ab. Wie groß dieser Retentionseffekt ist, ist unklar, da das Gesamtsystem HOB oder Baumrigole nicht auf eine bestimmte Auftretenswahrscheinlichkeit von Starkregen bemessen wird. Es besteht Forschungsbedarf, welchen Effekt modifizierte Straßenbäume auf die Überflutungsminderung haben können und wie groß dieser im Vergleich zu anderen RWBA ist.

2.3.4.1 Hydrologisch optimierter Baumstandort

Bei einem hydrologisch optimierten Baumstandort (siehe Abbildung 2-11) wird die Wasserverfügbarkeit des Baums optimiert, in dem die Baumscheibe muldenförmig (nach-)profiliert wird, um gezielt Niederschlagsabflüsse von angrenzenden Straßen und Wegen zuzuführen. Die hydrologische Optimierung kann sowohl für Bestandsbäume als auch für Neupflanzungen umgesetzt werden. (BlueGreenStreets 2022)

Für die Größe der Pflanzgrube eines hydrologisch optimierten Baumstandorts existieren keine einheitlichen Regelungen. Jedoch wird in der FLL Richtlinie „Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 2“ (FLL 2010) für die Entwicklung eines Baumes in den ersten Jahren nach der Anpflanzung ein Mindestvolumen der Pflanzgrube von 12 m^3 und eine Tiefe des Wurzelraums von $1,5 \text{ m}$ empfohlen. Zudem sollte die Baumscheibe eine Mindestgröße von 6 m^2 aufweisen.

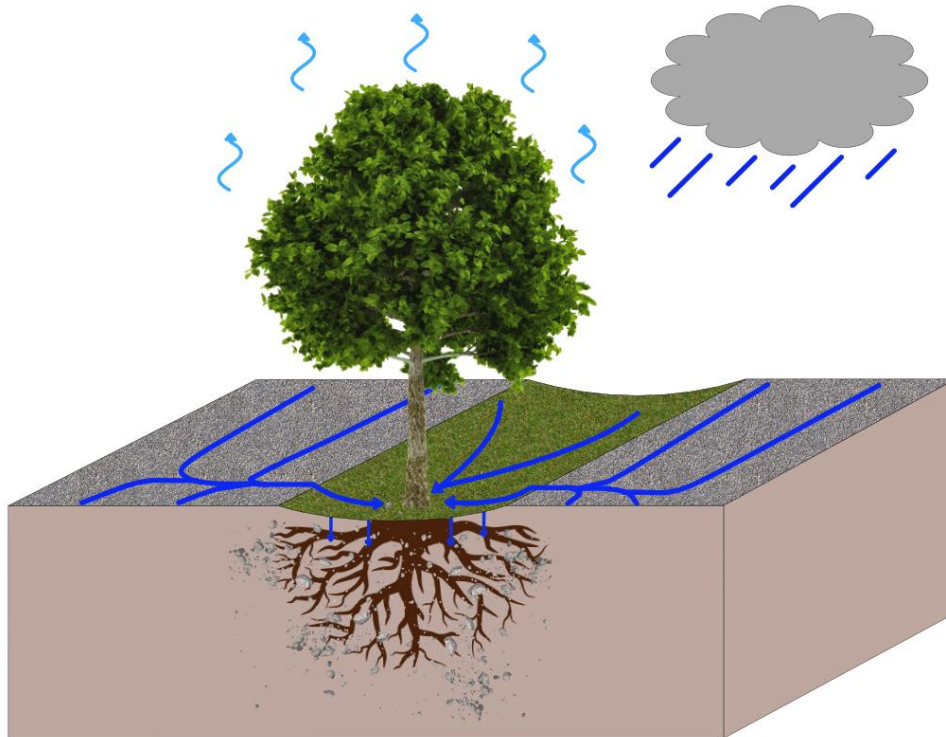


Abbildung 2-11: Hydrologisch optimierter Baumstandort

2.3.4.2 Baumrigole

Bei einer Baumrigole wird neben der Wasserverfügbarkeit auch der Wurzelraum eines Baumes optimiert. Dies kann durch eine Kombination von gezielter Niederschlagswasserzuführung, der Einbringung eines Speicherelements in die Pflanzengrube und einem angepassten Bodensubstrat erreicht werden. In der internationalen Forschung wird die Baumrigole als *tree trench* bezeichnet. Die technischen Ausführungen der Systeme variieren je nach Studie, beispielsweise hinsichtlich der Auswahl des Bodensubstrats, der Gestaltung der Rigole sowie der Zuleitung des Oberflächenabflusses. Dennoch sind die grundlegenden Prinzipien und Funktionsweisen vergleichbar (Richter et al. 2024). Abbildung 2-12 zeigt die Prinzipskizze einer Baumrigole mit Speicherelement, die im Rahmen dieser Arbeit nur als Baumrigole bezeichnet wird. Dem Wurzelraum wird Niederschlagswasser zugeführt, und es wird optimiertes, strukturreiches Bodensubstrat verwendet, das den Wasser- und Lufthaushalt sowie die Versickerungsfähigkeit und Wasserspeicherfähigkeit fördert (BlueGreenStreets 2022). Wichtig dabei ist, dass eine verzögerte Versickerung aus der Rigole gewährleistet wird, damit im Wurzelraum nicht dauerhaft wassergesättigte Verhältnisse auftreten (FLL 2010).

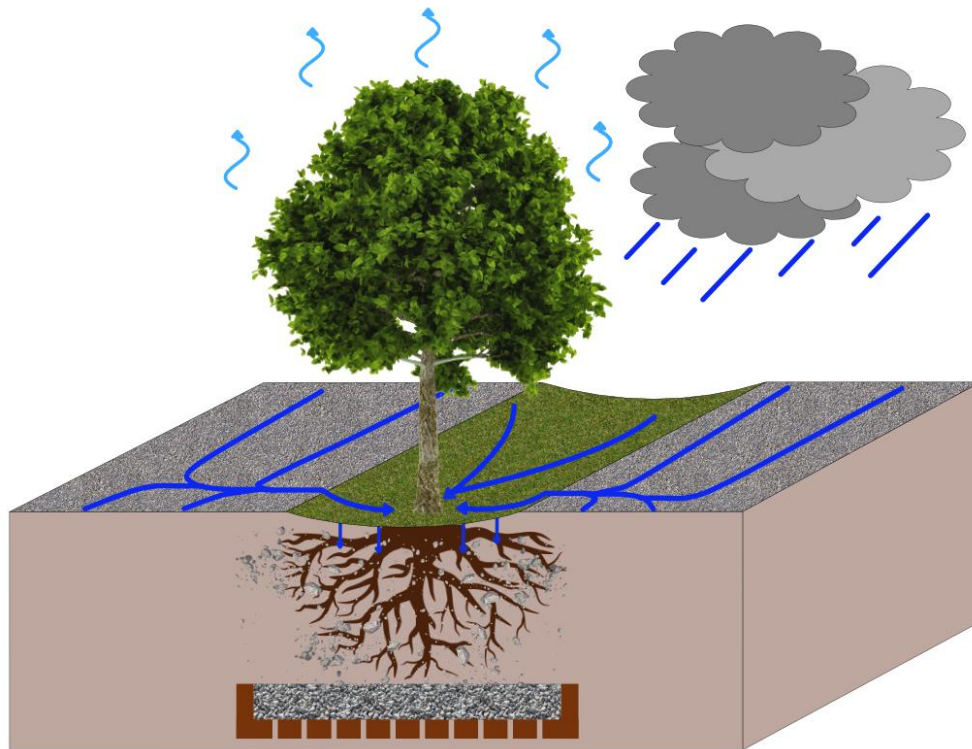


Abbildung 2-12: Baumrigole mit Speicherelement

Für die Ausführung von Baumrigolen existiert keine einheitliche Bemessungsvorschrift. Die einzelnen Systembausteine, Pflanzengrube und Rigole, können jedoch anhand der Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 1 und 2 (FLL 2015 und FLL 2010) sowie des DWA-Arbeitsblatts 138-1 (DWA 2024) dimensioniert werden. Für die Entwicklung eines Baumes in den ersten Jahren nach der Anpflanzung wird ein Mindestvolumen der Pflanzengrube von 12 m^3 und eine Tiefe des Wurzelraums von $1,5 \text{ m}$ empfohlen. Zudem sollte die Baumscheibe eine Mindestgröße von 6 m^2 aufweisen (FLL 2010). Bezüglich des eingesetzten Bodensubstrats kann die Wasserspeicherfähigkeit durch die Hinzufügung von offenporigen mineralischen Stoffen oder organischen Substanzen verbessert werden (FLL 2015). Die Rigole kann in Anlehnung an eine Rigole eines Mulden-Rigolen-Elements auf eine Jährlichkeit von $T = 5 \text{ a}$ bemessen werden (DWA 2024; vgl. Kapitel 2.3.1.2).

2.4 Modellierung der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen

In dieser Arbeit wird die Software InfoWorks ICM (Autodesk, Modellversion 2024.5) für die Modellierung der RWBA und den Aufbau des 1D/2D-Modells verwendet. In InfoWorks ICM werden RWBA als *Sustainable Urban Drainage System* (SUDS) Elemente abgebildet, deren Modellansätze identisch mit den *Low Impact Development* (LID) Elementen der Software *Storm Water Management Model* (SWMM) sind. In diesem Kapitel

werden ausschließlich die SUDS-Elemente mit den zugehörigen LID-Ansätze zur Modellierung von RWBA beschrieben. SWMM ist ein hydrodynamisches Niederschlags-Abfluss-Modell und wird seit 1970 von der US-amerikanischen Umweltbehörde EPA (*Environmental Protection Agency*) entwickelt. Die LID-Elemente wurden 2005 in SWMM integriert und seitdem kontinuierlich weiterentwickelt. Ihre Anwendung ist weltweit etabliert, besonders im Forschungsbereich finden sie breite Verwendung: Mu et al. (2022) und Dobkowitz et al. (2025) zeigen in ihren Literaturrecherchen, dass in wissenschaftlichen Veröffentlichungen die SWMM-LID-Elemente am häufigsten zur Abbildung von RWBA genutzt werden.

Die SUDS-Elemente weisen konzeptionell einen horizontalen Schichtaufbau auf, wobei in den verschiedenen Schichten und Schichtübergängen die physikalischen Prozesse hydrologisch nachgebildet werden. Abbildung 2-13 zeigt repräsentativ das Element *bio-retention cell*, das einer Tiefbeet-Rigole entspricht. Eine Tiefbeet-Rigole ist eine Sonderform des Mulden-Rigolen-Elements, das durch einen (Beton-)Rahmen (Tiefbeet) eingefasst wird. Die *bio-retention cell* ist die vollständigste Darstellung eines SUDS-Elementes, mit der sich alle anderen Elemente abbilden lassen. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Modellansätze für die verschiedenen Schichten anhand der *bio-retention cell* beschrieben. (Rossman und Huber 2016)

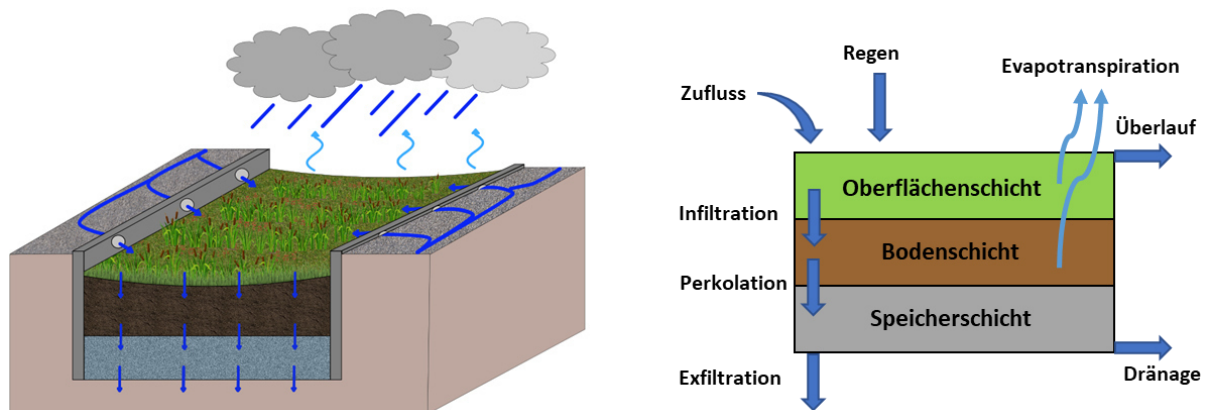


Abbildung 2-13: Darstellung des SUDS-Elements *bio-retention cell* (eigene Darstellung in Anlehnung an Rossman und Huber (2016))

Die oberste Schicht ist die Oberflächenschicht (*surface layer*), auf die der Niederschlag fällt und auf die Abfluss von angeschlossenen Flächen zufließen kann. Von der Schicht infiltriert das Wasser in die darunterliegende Bodenschicht (*soil layer*) oder verlässt das System durch Evapotranspiration. Wenn die Summe aus Niederschlag und Zufluss von angeschlossenen Flächen größer als die Infiltrationsrate in die Bodenschicht ist, läuft das überschüssige Wasser aus dem System über. Aus der Bodenschicht verlässt das Wasser das System durch Evapotranspiration oder perkoliert in die Speicherschicht (*storage layer*), aus der es entweder in den darunterliegenden natürlichen Boden exfiltriert oder das System durch eine Dränage verlässt. (Rossman und Huber 2016)

Für die hydrologische Modellierung des Elements werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Querschnittsfläche der einzelnen Schichten bleibt über die Tiefe konstant
- Eindimensionaler Durchfluss in vertikaler Richtung innerhalb der Schicht
- Der Zufluss zu einer Schicht wird gleichmäßig über die Oberfläche verteilt
- Der Feuchtigkeitsgehalt ist gleichmäßig in der Bodenschicht verteilt
- Die Matrixkräfte innerhalb der Speicherschicht sind vernachlässigbar, das Wasser wird von unten nach oben gespeichert

Unter diesen Annahmen kann ein SUDS-Element durch die Lösung einer Reihe einfacher Massebilanzgleichungen abgebildet werden. Die einzelnen Gleichungen beschreiben die zeitliche Veränderung des Wassergehalts in einer Schicht als Differenz zwischen zufließender und abfließender Wassermenge. Die folgende Gleichungen werden dabei für die einzelnen Schichten verwendet (Rossman und Huber 2016):

Oberflächenschicht:

$$\phi_1 \frac{\partial d_1}{\partial t} = i + q_0 - e_1 - f_1 - q_1 \quad (2-9)$$

Bodenschicht:

$$D_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = f_1 - e_2 - f_2 \quad (2-10)$$

Speicherschicht:

$$\phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - f_3 - q_3 \quad (2-11)$$

mit den zeitveränderlichen Größen (Kleinbuchstaben):

- d_1 = Einstautiefe des Wassers auf der Oberfläche [m]
- θ_2 = Feuchtigkeitsgehalt der Bodenschicht [Wasservolumen/gesamtes Bodenvolumen]
- d_3 = Wasserstand in der Speicherschicht [m]
- i = Niederschlagsrate [m/s]
- q_0 = Zufluss von angeschlossenen Flächen [m/s]
- q_1 = Oberflächenabfluss oder Überlauf [m/s]
- q_3 = Drainageabfluss [m/s]
- e_1 = Evapotranspirationsrate auf der Oberflächenschicht [m/s]

- $e_2 =$ Evapotranspirationsrate in der Bodenschicht [m/s]
 $f_1 =$ Infiltrationsrate des Oberflächenwassers in die Bodenschicht [m/s]
 $f_2 =$ Perkulationsrate des Wassers durch die Bodenschicht in die Speicherschicht [m/s]
 $f_3 =$ Exfiltrationsrate des Wassers von der Speicherschicht in den anstehenden Boden [m/s]

und den Konstanten (Großbuchstaben):

- $\phi_1 =$ Anteil des Freibords über der Oberflächenschicht ohne Vegetation [Freibordvolumen ohne Vegetation/(Freibordvolumen + Vegetationsvolumen)]
 $\phi_2 =$ Porosität der Bodenschicht [Porenvolumen/Gesamtvolumen]
 $\phi_3 =$ Hohlraumanteil der Speicherschicht [Hohlraumvolumen/Gesamtvolumen]
 $D_2 =$ Dicke der Bodenschicht [m]

Die Massenströme (q , e , f) in den Gleichungen sind Funktionen des aktuellen Wasserstands oder -gehalt in den verschiedenen Schichten (d_1 , θ_2 , d_3) und der spezifischen Orts- und Bodeneigenschaften. Die Gleichungen können numerisch für jeden Zeitschritt gelöst werden und damit aus einer Zuflussganglinie ($i + q_0$) der Überlauf (q_1), der Drainageabfluss (q_3) und die Exfiltration (f_3) aus dem SUDS-Element berechnet werden. (Rossman und Huber 2016)

Im Folgenden wird beschrieben, wie die verschiedenen Massenströme errechnet werden, wobei nur auf die für diese Arbeit relevanten Gleichungen eingegangen wird. Für eine vollständige Beschreibung wird auf das SWMM Reference Manual Volumen III – Water Quality⁴ (Rossman und Huber 2016) verwiesen.

Oberflächeninfiltration

Die Infiltration von der Oberfläche (f_1) in die Bodenschicht wird mithilfe der Green-Ampt Gleichung modelliert:

$$f_1 = K_{2s} \left(1 + \frac{(\phi_2 - \theta_{20})(d_1 + \psi_2)}{F} \right) \quad (2-12)$$

mit:

- $f_1 =$ Infiltrationsrate [m/s]
 $K_{2s} =$ Hydraulische Leitfähigkeit des wassergesättigten Bodens [m/s]

⁴ <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100P2NY.PDF?Dockkey=P100P2NY.PDF>, Seite 102 ff.

- θ_{20} = Feuchtigkeitsgehalt an der Oberseite der Bodenschicht [Anteil]
 ψ_2 = Saughöhe an der im Boden gebildeten Infiltrations-Feuchtefront [m]
 F = Kumuliertes Infiltrationsvolumen über ein Regenereignis [m]

Die Gleichung gilt erst, wenn sich an der Oberseite der Bodenzone ein gesättigter Zustand eingestellt hat. Vorher infiltriert der gesamte Zufluss.

Bodenperkolation

Die Perkolation (f_2 [m/s]) durch die Bodenschicht wird nach dem Darcy-Gesetz berechnet:

$$f_2 = \begin{cases} K_{2S} \exp(-HCO(\phi_2 - \theta_2)), & \theta_2 > \theta_{FC} \\ 0, & \theta_2 \leq \theta_{FC} \end{cases} \quad (2-13)$$

mit:

- HCO = Abklingkonstante, beschreibt wie die Leitfähigkeit mit abnehmender Feuchtigkeit abnimmt [-]
 θ_{FC} = Feldkapazität des Bodens [Anteil]
 θ_2 = Feuchtigkeitsgehalt [Anteil]

Exfiltration

Die Exfiltration (f_3) aus der Speicherschicht in den natürlich anstehenden Boden hängt vom Füllstand der Speicherschicht und dem Feuchtigkeitsprofil des anstehenden Bodens ab. Da das Feuchtigkeitsprofil des anstehenden Bodens jedoch unbekannt ist, wird als Exfiltrationsrate direkt die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bodens verwendet. Der Anstieg der Exfiltrationsrate bis hin zur gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit wird vernachlässigt und so das Exfiltrationsvolumen leicht überschätzt. Die hydraulische Leitfähigkeit wird vom Anwender über den Parameter Sickerrate (*seepage rate*) in Abhängigkeit der Bodenart festgelegt. Ein Wert von 0 für die Sickerrate bedeutet, dass aus der Speicherschicht kein Wasser exfiltriert, da der anstehende Boden als wasserundurchlässig angenommen wird. (Rossman und Huber 2016)

Dränageabfluss aus der Speicherschicht

Der Dränageabfluss (q_3) aus der Speicherschicht wird über eine empirische Gleichung ermittelt, bei der allein die hydraulische Druckhöhe eine physikalische Bedeutung hat:

$$q_3 = C_{3D}(h_3)^{\eta_{3D}} \quad (2-14)$$

mit:

$$h_3 = \text{Hydraulische Druckhöhe über der Dränage [m]}$$

$$C_{3D} = \text{Abflussbeiwert der Dränage [m}^{-(\eta_{3D}-1)/s}]$$

$$\eta_{3D} = \text{Abflussexponent der Dränage [-]}$$

Die hydraulische Druckhöhe über der Dränage ändert sich in Abhängigkeit der Einsauhöhe wie folgt:

$$h_3 = 0 \quad \text{bei } d_3 \leq D_{3D}$$

$$h_3 = d_3 - D_{3D} \quad \text{bei } D_{3D} < d_3 < D_3$$

$$h_3 = (D_3 - D_{3D}) + (\theta_2 - \theta_{FC}) / (\phi_2 - \theta_{FC}) D_2 \quad \text{bei } d_3 = D_3 \text{ und } \theta_{FC} < \theta_2 < \phi_2$$

$$h_3 = (D_3 - D_{3D}) + D_2 + d_1 \quad \text{bei } d_3 = D_3 \text{ und } D_3 = \phi_2$$

mit:

$$d_3 = \text{Wasserstand in der Speicherschicht [m]}$$

$$D_{3D} = \text{Höhe des Dränageablaufs über den Boden der Speicherschicht [m]}$$

$$D_3 = \text{Speicherschichtdicke [m]}$$

Der Dränageabfluss aus der Speicherschicht beginnt erst, wenn der Wasserstand in der Speicherschicht die Höhe des Dränageablaufs überschreitet. Wird C_{3D} zu 0 gesetzt, findet kein Dränageabfluss statt. (Rossman und Huber 2016)

Überlauf und Oberflächenabfluss

Es wird davon ausgegangen, dass sämtliches Oberflächenwasser, dessen Wasserstand den Freibord überschreitet, überläuft. (Rossman und Huber 2016):

$$q_1 = \max [(d_1 - D_1)] / \Delta t, 0 \quad (2-15)$$

mit:

$$D_1 = \text{Freibordhöhe auf der Oberfläche [m]}$$

Der Abfluss auf der Oberflächenschicht wird mit der Manning-Formel berechnet. Dabei wird angenommen, dass die horizontale Ausdehnung des Oberflächenabflusses wesentlich größer ist als die vertikale. (Rossman und Huber 2016):

$$q_1 = \frac{1,49}{n_1} \sqrt{S_1} (W_1 / A_1) \phi_1 (d_1 - D_1)^{5/3} \quad (2-16)$$

mit:

$$n_1 = \text{Oberflächenrauheitskoeffizient [-]}$$

$$S_1 = \text{Gefälle [m]}$$

$$W_1 = \text{Kantenlänge der Fläche, an der Abfluss gesammelt wird [m]}$$

$D_1 =$ Freibordhöhe [m]

$A_1 =$ Fläche [m²]

Abfluss aus der Dränageschicht

Das LID-Element *green roof* zur Abbildung von Gründächern ist ähnlich wie die *bio-retention cell* aufgebaut, allerdings wird statt der Speicherschicht eine Dränageschicht unter der Bodenschicht angeordnet. Die Dränageschicht besteht aus einer Dränmatte oder Dränelementen, um das Wasser an der Unterseite der Gründachkonstruktion abzuleiten. Der Abfluss aus der Dränageschicht (q_3) wird nach Manning berechnet: (Rossman und Huber 2016)

Dränageschicht:

$$\phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - e_3 - q_3 \quad (2-17)$$

Abfluss aus der Dränageschicht:

$$q_3 = \frac{1,49}{n_3} \sqrt{S_1} (W_1/A_1) \phi_3 (d_3)^{5/3} \quad (2-18)$$

mit:

$n_3 =$ Oberflächenrauheitskoeffizient der Dränmatte [-]

$\phi_3 =$ Hohlraumanteil der Speicherschicht (Hohlraumvolumen/Gesamtvolumen)

$d_3 =$ Wasserstand in der Dränageschicht [m]

2.5 Kenntnisstand zur Wirksamkeit von Regenwasserbewirtschaftungsanlagen zur Starkregenvorsorge

Die Wirksamkeit von RWBA zur Starkregenvorsorge wird weltweit in einer Vielzahl von wissenschaftlichen Studien untersucht. In den Studien wird üblicherweise ein reales Untersuchungsgebiet modelliert, in dem zusätzlich RWBA abgebildet werden. Anschließend wird das Überflutungsgeschehen mit und ohne RWBA simuliert und die Ergebnisse miteinander verglichen. Mit dieser Vorgehensweise ist es möglich, die Wirkung der Anlagen im Untersuchungsgebiet zu quantifizieren und allgemeine Aussagen zu treffen. Konkrete Effekte, wie z. B. die prozentuale Reduzierung des Überflutungsvolumens durch die Anlagen, können jedoch nicht verallgemeinert werden, da diese stark gebietsabhängig sind. Des Weiteren ist der Vergleich konkreter Effekte zwischen Simulationsstudien nur eingeschränkt möglich, da sich die Untersuchungsgebiete der Studien hinsichtlich ihrer Größe (regional, städtisch oder einzugsgebietsbezogen), Topografie, Siedlungsstruktur, Bodenart, Entwässerungssysteme und daraus resultierend in ihrer Anfälligkeit gegenüber Überflutungen unterscheiden. Darüber hinaus werden sowohl für die Darstellung der Untersuchungsgebiete als auch für die RWBA unterschiedliche Modellansätze verwendet. Innerhalb einer Studie kann jedoch die überflutungsmindernde Wirkung verschiedener Anlagentypen durch Szenarien ermittelt und relativ verglichen werden. Diese relativen Wirkungsunterschiede zwischen den Anlagen können mit den Ergebnissen anderer Studien abgeglichen werden, in denen ebenfalls die Leistungsfähigkeit verschiedener Anlagentypen untersucht wird.

Im Folgenden werden die wissenschaftlichen Studien zunächst hinsichtlich der Untersuchungsgebiete, Modellansätze sowie der Auswahl, Umsetzung und Dimensionierung der RWBA verglichen. Anschließend werden allgemeine Erkenntnisse und Zusammenhänge zur Wirkung von RWBA im Kontext der Starkregenvorsorge abgeleitet. Schließlich werden Studien identifiziert, die die relativen Wirkungsunterschiede verschiedener Anlagentypen analysieren.

2.5.1 Gegenüberstellung von Studien

In den untersuchten Studien werden fast ausschließlich Simulationsmodelle verwendet, um die Wirksamkeit der Anlagen zu analysieren, da Daten aus Feldmessungen oder anderen Quellen nur sehr begrenzt verfügbar sind (Almaaitah et al. 2021). Eine Ausnahme bildet die Veröffentlichung von Sörensen und Emilsson (2019), in der Schadensmeldungen an Versicherungen aus einem Stadtviertel, das mit RWBA nachgerüstet wurde, mit den Schadensmeldungen benachbarter Stadtviertel verglichen werden.

Im Anhang A7 sind die Eigenschaften sowie Abbildungen der Untersuchungsgebiete und der RWBA aus den Studien zusammengestellt. Die Größe der Untersuchungsgebiete reicht von einzelnen Stadtvierteln (u. a. Haghigatafshar et al. 2018 und Webber

et al. 2020) über Städte (Mu et al. 2022 und Costa et al. 2021) bis hin zu ganzen Regionen mit mehreren hundert Quadratkilometern (Hamers et al. 2023 und Mei et al. 2018). Je größer das Untersuchungsgebiet, desto größer werden die Modellierungsansätze zur Abbildung der Gebiete: Während für Stadtviertel und Städte meist 1D/2D-Modelle genutzt werden, beschränken sich regionale Studien auf reine 1D- oder 2D-Ansätze.

In den Studien werden verschiedene RWBA untersucht. In Tabelle 2-2 werden den in den Studien untersuchten Anlagen vergleichbare Anlagentypen aus dieser Arbeit zugeordnet. Es zeigt sich, dass am häufigsten der Effekt von Versickerungsanlagen analysiert wird, gefolgt Zisternen und Gründächern sowie an letzter Stelle Baumrigolen. Bei den Gründächern werden ausschließlich extensive Varianten modelltechnisch untersucht.

Tabelle 2-2: In den Studien untersuchte RWBA

| RWBA | Referenz | Vergleichbar mit Anlagentyp |
|-----------------------------------|---|-----------------------------|
| <i>swale, rain gardens</i> | Mu et al. (2022), Haghigatafshar et al. (2018), Bai et al. (2019), Costa et al. (2021), Webber et al. (2020), Mei et al. (2018), Cui et al. (2019), Ahiablame und Shakya (2016) | Mulden |
| <i>permeable pavements</i> | Bae und Lee (2020), Bai et al. (2019), Costa et al. (2021), Ahiablame und Shakya (2016), Cui et al. (2019), Webber et al. (2020) | - |
| <i>infiltration trench</i> | Mu et al. (2022), Haghigatafshar et al. (2018), Bai et al. (2019), Mugume et al. (2024) | - |
| <i>bio-retention cell</i> | Bai et al. (2019), Mugume et al. (2024), Mei et al. (2018) | Mulden-Rigolen-Element |
| <i>detention pond</i> | Haghigatafshar et al. (2018), Mugume et al. (2024) | - |
| <i>green roof</i> | Haghigatafshar et al. (2018), Bae und Lee (2020), Bai et al. (2019), Costa et al. (2021), Mei et al. (2018), , Webber et al. (2020) | Extensives Gründach |
| <i>rainwater harvesting tanks</i> | Mu et al. (2022), Bai et al. (2019), Ortega Sandoval et al. (2023), Mei et al. (2018), Ahiablame und Shakya (2016), Mugume et al. (2024), , Webber et al. (2020) | Zisterne |
| <i>tree pit</i> | Ortega Sandoval et al. (2023) | Baumrigole |

Für die Modellierung der RWBA werden größtenteils die SWMM-LID-Ansätze verwendet. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Mu et al. (2022) und Dobkowitz et al. (2025), die wissenschaftliche Veröffentlichungen analysiert haben. Weitere Möglichkeiten zur Modellierung der RWBA umfassen vereinfachte Ansätze, bei denen die bewirtschaftete Fläche im Modell abgekoppelt wird (Costa et al. 2021) oder stark er-

höhte Anfangsverluste aufweist (Webber et al. 2020). Darüber hinaus kann eine erhöhte Infiltrationsrate in Verbindung mit Niederschlagspeicherung im Bereich der RWBA definiert werden (Haghighatafshar et al. 2018).

In Bezug auf die Platzierung der Anlagen im Untersuchungsgebiet werden in den Studien unterschiedlich detaillierte Strategien verfolgt. Webber et al. (2020) definieren, dass die gesamte befestigte Fläche bewirtschaftet werden kann: Alle Dächer werden als Gründächer ausgeführt oder an Zisternen angeschlossen; die gesamte befestigte Fläche (mit Ausnahme von Dachflächen) wird von Mulden bewirtschaftet. Dabei wird nicht berücksichtigt, ob ausreichend große versickerungsfähige Grünflächen in unmittelbarer Nähe zu den abflusswirksamen Flächen vorhanden sind. Eine ebenfalls weniger detaillierte Umsetzungsstrategie verfolgen Mugume et al. (2024), bei der pauschal ein festgelegter Abflussanteil jedes Teileinzugsgebietes Versickerungsanlagen zugeführt wird. Hamers et al. (2023) wählen einen detaillierteren Ansatz und verschneiden GIS-basiert die Flächen, in denen RWBA auf Basis der Landnutzung umgesetzt werden können, mit überflutungsgefährdeten Flächen, die anhand einer Überflutungssimulation ermittelt werden. Als Ergebnis erhält man die Flächen, auf denen die Anlagen platziert werden können und Überflutungsminderung erforderlich ist. Ortega Sandoval et al. (2023) identifizieren GIS-basiert die physikalisch geeigneten Flächen (Bodeneigenschaften, Größenbeschränkungen und Landnutzung) für RWBA, berücksichtigen aber zusätzlich kulturelle, soziale, finanzielle, institutionelle, organisatorische, politische, technische und städtebauliche Restriktionen.

Die überflutungsmindernde Wirkung von RWBA hängt maßgeblich von ihrer Dimensionierung ab. In Deutschland werden Versickerungsanlagen üblicherweise auf eine Jährlichkeit von $T = 5$ a dimensioniert. Dabei ist die Anlagengröße im Wesentlichen von der angeschlossenen befestigten Fläche und der Bodenart abhängig. In keiner der hier behandelten Studien basiert die Anlagengröße auf einer Dimensionierung, die vergleichbar ist mit dem in Deutschland üblichen Verfahren. Überwiegend werden nur der Flächenbedarf und Standardaufbau der Anlagen genannt, teilweise noch die angeschlossene befestigte Fläche. Eine Bemessung auf eine bestimmte Jährlichkeit oder Wasserbilanz (bestimmter Anteil des Niederschlags muss versickern) ist nicht ersichtlich (Mu et al. (2022), Haghighatafshar et al. (2018), Bai et al. (2019), Webber et al. (2020)). Die gezielte Dimensionierung von Versickerungsanlagen über ihr übliches Bemessungsniveau und ihr Effekt bei extremen Starkregen wird in keiner der Studien untersucht. Allgemein wird die Wirksamkeit der RWBA größtenteils anhand Modellregen mit einer Jährlichkeit von $T = 2 - 100$ a analysiert. Lediglich Haghighatafshar et al. (2018) simulieren das Überflutungsgeschehen mit einem realen Ereignis, dem eine Jährlichkeit im Bereich von $T = 200 - 300$ a zugeordnet werden kann.

2.5.2 Wirkung von Regenwasserbewirtschaftungsanlagen zur Starkregenvorsorge

In allen Studien wird festgestellt, dass durch RWBA ein Rückgang der Überflutung und des Abflussgeschehens im Untersuchungsgebiet erreicht wird. Als Bewertungskriterien werden folgende Größen herangezogen, geordnet nach ihrer Häufigkeit der Verwendung (absteigend):

- Reduktion des Überflutungsvolumens
- Reduktion der überfluteten Fläche
- Reduktion der maximalen Wasserstände
- Reduktion des Spitzenabflusses
- Anzahl der überstauten Schächte
- Schaden an Infrastruktur

Die Reduktion durch die RWBA ist im Wesentlichen abhängig von der angeschlossenen Fläche, der Intensität der Niederschlagsbelastung, der Verortung der Anlagen und deren Typ sowie der Überflutungsanfälligkeit des Untersuchungsgebiets. Es gilt der naheliegende Zusammenhang, dass mit zunehmender bewirtschafteter Fläche die Überflutungsminde rung durch die Anlagen steigt. Durch die Kombination unterschiedlicher Anlagentypen wie Versickerungsanlagen, Gründächern und Baumrigo len kann die maximale Fläche bewirtschaftet und somit der größte Effekt erzielt werden (Ortega Sandoval et al. 2023, Cui et al. 2019, Ahiablame und Shakya 2016).

In der Fachwelt besteht Einigkeit darüber, dass die relative Wirksamkeit von RWBA mit zunehmender Niederschlagsintensität abnimmt: Costa et al. (2021) kommen zu dem Schluss, dass RWBA Überflutungen infolge von Regenfällen mit geringeren Jährlichkeiten signifikant reduzieren können, bei extremen Starkregen die Überflutungsgefahr jedoch bestehen bleibt, was von Ortega Sandoval et al. (2023) und Mugume et al. (2024) bestätigt wird. Allerdings zeigen Haghghatafshar et al. (2018) in einer Simulationsstudie und Sörensen und Emilsson (2019) anhand von Versicherungsdaten, dass RWBA auch bei extremen Starkregen wirksam Überflutungen reduzieren können, sofern ein sehr hoher Anteil der Fläche bewirtschaftet wird. In beiden Studien ist das Untersuchungsgebiet das Stadtviertel Augustenborg in Malmö (Schweden). Zwischen 1998 und 2002 wurden in dem 30 ha großen Gebiet verschiedene RWBA (Versickerungsgräben, Teiche, Mulden, Gründächer und ein Regenrückhaltebecken) umgesetzt, nachdem es dort wiederholt zu Überflutungen gekommen war. Von den 30 ha Gebietsfläche sind 19,3 ha durch RWBA bewirtschaftet, was einem Bewirtschaftungsanteil von 64 % entspricht. Im Sommer 2014 wurde Malmö von einem extremen Starkregenereignis ($h_N = 100 \text{ mm}$, $D = 220 \text{ min}$) getroffen, dem eine Jährlichkeit von $T = 200 - 300 \text{ a}$ zugeordnet werden kann. Haghghatafshar et al. (2018) nutzen dieses Ereignis als Modellinput und simulieren eine Reduktion des Überflutungsvolumens um 64 % durch RWBA. Sörensen und Emilsson (2019) vergleichen die Anzahl von überflutungsbezogenen Schadensmeldungen an Versicherungen in Augustenborg infolge des

Regenereignisses mit benachbarten Stadtvierteln. Sie bestätigen, dass Augustenborg weniger von Überflutungen betroffen war.

Aufgrund der Heterogenität der Untersuchungsgebiete und Modellansätze kann die konkrete Überflutungsreduktion durch RWBA nicht verallgemeinert und auf andere Gebiete übertragen werden. Dennoch werden in Tabelle 2-3 die Reduzierungen des Überflutungsvolumens miteinander verglichen, um aufzuzeigen, in welchen Größenordnungen diese liegen. Als Bezugsgrößen dienen der Anlagentyp, der Anteil der bewirtschafteten Fläche an der Gesamtgebietsgröße und die Regenintensität. Bae und Lee (2020) analysieren zwei Untersuchungsgebiete in Seoul (Südkorea), die vergleichbare Gebietsgrößen und Befestigungsgrade aufweisen. Dennoch unterscheidet sich die Reduktion des Überflutungsvolumens trotz ähnlicher Bewirtschaftungsanteile deutlich, was durch unterschiedliche Gebietseigenschaften erklärt werden kann. Costa et al. (2021) berichten von hohen Reduktionen des Überflutungsvolumens, obwohl der Anteil der bewirtschafteten Fläche im Vergleich zu anderen Studien gering ist. In den Untersuchungen von Mei et al. (2018) werden selbst beim 100 jährlichen Regenereignis noch große Reduktionen erzielt. Zusammenfassend ergibt sich ein uneinheitliches Bild hinsichtlich der Reduzierung des Überflutungsvolumens durch RWBA.

Tabelle 2-3: Vergleich der Reduzierung des Überflutungsvolumen durch RWBA verschiedener Simulationsstudien

| RWBA | Von RWBA bewirtschaftete Gebietsfläche | Reduzierung des Überflutungsvolumens bei Regenbelastung mit T | | | Referenz |
|----------------------------------|--|---|--------|---------|---------------------|
| | | ≤ 10 a | < 50 a | ≤ 100 a | |
| Gründächer und Rasengittersteine | 11,2 % | 54,6 % | - | - | Bae und Lee (2020)* |
| Rasengittersteine | 14,3 % | 24,8 % | - | - | Bae und Lee (2020)* |
| Rasengittersteine | 0,5 % | 3,6 % | - | 1,3 % | Costa et al. (2021) |
| Rasengittersteine | 1 % | 6,9 % | - | 4 % | Costa et al. (2021) |
| Gründächer | 1,2 % | 7,2 % | - | 4,4 % | Costa et al. (2021) |
| Gründächer | 4,4 % | 27,5 % | - | 21 % | Costa et al. (2021) |
| Gründächer | 18,3 % | - | - | 33 % | Mei et al. (2018) |
| Rasengittersteine | 12 % | - | - | 36 % | Mei et al. (2018) |
| Mulden | 5,7 % | - | - | 14 % | Mei et al. (2018) |

* Bae und Lee (2020) analysieren zwei Untersuchungsgebiete

Neben der angeschlossenen Fläche beeinflusst auch die Verortung der RWBA deren Effekt auf die Überflutungsminde rung. Hamers et al. (2023) zeigen auf regionaler Ebene, dass RWBA in überflutungsgefährdeten Bereichen angeordnet werden sollten. Diese Ergebnisse werden von Costa et al. (2021) in einer stadtgebietsweiten Analyse bestätigt. Des Weiteren ist es in größeren Entwässerungssystemen sinnvoll, Oberstrom gelegene Teileinzugsgebiete durch RWBA abzukoppeln, um die Belastung des nachgeschalteten Systems zu reduzieren (Haghighatafshar et al. 2018 und Almaaitah et al. 2021).

2.5.3 Vergleich der Wirkung verschiedener Anlagentypen

In folgenden Studien werden mehrere Szenarien mit jeweils einem Anlagentypen simuliert und die Ergebnisse verglichen. Dadurch können Rückschlüsse auf die relative Leistungsfähigkeit der einzelnen Anlagentypen untereinander gezogen werden – allerdings nur, wenn eine einheitliche Bezugsgröße bekannt ist. Die Bezugsgröße kann bspw. die bewirtschaftete befestigte Fläche, das summierte Retentionsvolumen oder die Kosten von Maßnahmen sein.

Costa et al. (2021) untersuchen den Effekt von Gründächern und Rasengittersteinen auf Parkplätzen zur Überflutungsreduzierung in Eindhoven (Niederlande). Die 89 km² große Stadt wird mit einem 1D/2D-Modell abgebildet, die RWBA stark vereinfacht berücksichtigt, in dem bei der Simulation eines Starkregenereignisses angenommen wird, dass bei den angeschlossenen Dach- und Parkplatzflächen kein Abfluss auftritt. Für einen Vergleich der Leistungsfähigkeit ist diese Abbildungsart unzureichend, da sich die Anlagentypen nicht in ihrer Wirkungsweise unterscheiden. Lediglich die unterschiedliche Verortung der bewirtschafteten Flächen hat einen Einfluss auf das Überflutungsgeschehen.

Webber et al. (2020) modellieren ein 150 ha großes, hochversiegeltes Einzugsgebiet in der Stadt Melbourne (Australien). Das Untersuchungsgebiet wird mit einem vereinfachten, aber schnellen 2D-Ansatz modelliert. Das Kanalnetz wird berücksichtigt, in dem die kanalisierten befestigten Flächen pauschal mit einer Infiltrationsrate von 15 mm/h versehen werden. Die RWBA werden ebenfalls vereinfacht abgebildet, indem eine Anfangsverlustrhöhe angesetzt wird. In Tabelle 2-4 sind die Anfangsverlustrhöhen und bewirtschafteten Flächen der Anlagen aufgelistet. Durch die Zisternen wird die größte Reduktion der maximalen Wasserstände erzielt, darauf folgen die Gründächer, dann die Rasengittersteine und Mulden. Aufgrund der vereinfachten Abbildung der RWBA ist die Reihenfolge ihre Wirksamkeit bereits aus den angesetzten Verlustrhöhen sichtbar. Es ist fraglich, ob ein solcher Ansatz für einen Leistungsvergleich verschiedener Anlagentypen herangezogen werden kann. Des Weiteren sind die angesetzten Verlustrhöhen, die aus der Dimensionierung der Anlagen abgeleitet werden, zu diskutieren: Ein Rückhalt von 10 mm Niederschlagshöhe lässt auf ein extensives Gründach schließen, wobei dies immer noch einen sehr konservativen Wert darstellt. Bei den Zisternen wird im Gegensatz dazu von komplett leeren Zisternen ausgegangen, so dass ihr Volumen vollständig zum Rückhalt zur Verfügung steht. Dieser Ansatz widerspricht der prioritären Funktion von Zisternen, die in der Bereitstellung von Regenwasser liegt, sodass diese gefüllt sein sollten. Die Anfangsverlustrhöhe der Mulden basiert auf der Dimensionierung, bei der an 2 m² Muldenfläche 100 m² befestigte Fläche angeschlossen werden, was einem Verhältnis von Muldenfläche zur angeschlossenen befestigten Fläche von 2 % entspricht. Im Vergleich dazu wird nach DWA-A 138-1 (DWA 2024) ein Verhältnis im Bereich von 5 % - 15 % angesetzt, also wesentlich größere, leistungsfähigere Mulden. Die detaillierte Betrachtung der

Modellierung und Dimensionierung der RWBA verdeutlicht die schwierige Vergleichbarkeit zwischen den Studien aufgrund der Heterogenität der gewählten Ansätze.

Tabelle 2-4: Anfangsverlustrhöhe und bewirtschaftete Fläche RWBA (Webber et al. 2020)

| RWBA | Anfangsverlustrhöhe [mm] | Bewirtschaftete Fläche [ha] |
|---|--------------------------|-----------------------------|
| Gründächer | 10 | 59,1 |
| Zisternen | 25 | 59,1 |
| Mulden, undurchlässige Fläche angeschlossen | 7 | 66,25 |
| Rasengittersteine auf allen undurchlässigen Flächen | 10 | 66,25 |

Ortega Sandoval et al. (2023) untersuchen den Effekt von Zisternen und Baumrigolen zur Überflutungsminderung in einem 50 ha großen Stadtviertel von Bogotá (Kolumbien). Das Untersuchungsgebiet wird mit einem 1D/2D-Modell abgebildet, die RWBA werden mit den SWMM-LID Ansätzen modelliert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zisternen einen deutlich größeren Effekt zur Überflutungsminderung haben und der Effekt der Baumrigolen vernachlässigbar ist.

Mugume et al. (2024) modellieren zwei Stadtteile (33,1 km² und 32,7 km²) von Kampala (Uganda) mit einem 1D/2D-Modell. Als RWBA werden Zisternen, Versickerungsgräben, Regenrückhaltebecken und Tiefbeetrigolen mit den SWMM-LID-Ansätzen abgebildet. Um ihre Wirksamkeit zur Überflutungsminderung vergleichbar zu machen, haben die einzelnen Anlagentypen das gleiche Gesamtretentionsvolumen. Zusätzlich wird eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem Regenereignis mit der Jährlichkeit $T = 100$ a ebenfalls die Zisternen den größten Effekt zur Überflutungsminderung aufweisen, gefolgt von den Versickerungsgräben, den Tiefbeetrigolen und zuletzt den Regenrückhaltebecken, die im Gegensatz zu den anderen Anlagen zentral im Entwässerungssystem angeordnet sind. Bei der Kosten-Nutzen-Analyse, in der die Investitions- und Unterhaltungskosten den Schadenskosten im Überflutungsfall gegenübergestellt werden, schneiden die Zisternen ebenfalls am besten ab, gefolgt von Tiefbeetrigolen, Versickerungsgräben und Regenrückhaltebecken.

Mei et al. (2018) untersuchen das 651,8 km² große Liangshuihe-EZG (Peking, China), das mit einem 1D-Modell abgebildet wird. Die RWBA werden mit den SWMM-LID-Ansätzen abgebildet und umfassen Gründächer, Rasengittersteine, Mulden und Tiefbeetrigolen. Die überflutungsmindernde Wirkung der Anlagen bei einem 100 jährlichen Regenereignis und die darauf aufbauende Kosten-Nutzen-Analyse zeigen, dass die Mulden das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen, gefolgt von den Rasengittersteinen, den Gründächern und zuletzt den Tiefbeetrigolen.

In den hier beschriebenen Ergebnissen stechen die Zisterne als leistungsfähige und auch verhältnismäßig kostengünstige Anlagen hervor. Dabei muss jedoch erwähnt werden, dass bei Niederschlagsbeginn von komplett leeren Speichern ausgegangen wird, wodurch die Randbedingungen besonders positiv für ihren Effekt zur Überflutungsminderung ausfallen.

2.5.4 Fazit und Forschungsbedarf

Regenwasserbewirtschaftungsanlagen haben eine signifikante Wirkung auf die Überflutungsminderung, sofern ein ausreichender Teil der befestigten Flächen des Gebiets angeschlossen wird. Der notwendige Bewirtschaftungsanteil hängt u. a. von den Gebietseigenschaften, dem Anlagentyp, der Niederschlagsintensität und vor allem vom Ziel der Regenwasserbewirtschaftung ab, weshalb er nicht allgemeingültig festgelegt werden kann.

In den untersuchten Studien wird am häufigsten der Effekt von Versickerungsanlagen analysiert, gefolgt von Gründächern, Zisternen und an letzter Stelle Baumrigolen. Allerdings sind die betrachteten Versickerungsanlagen in keiner der Studien auf eine bestimmte Jährlichkeit ausgelegt oder gezielt zur Rückhaltung extremer Starkregenereignisse erweitert worden.

Insgesamt ist die Literaturrecherche durch eine hohe Heterogenität der Studien gekennzeichnet. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Untersuchungsgebiete, Modellansätze und angenommenen Randbedingungen, was einen Vergleich der Ergebnisse erschwert. Dobkowitz et al. (2025) kommen in ihrem Übersichtsartikel zu demselben Schluss und nennen die eingeschränkte Vergleichbarkeit der analysierten Studien als die zentrale Herausforderung. Aufgrund der begrenzten Datenlage ist es schwierig, relative Wirkungsunterschiede verschiedener Anlagentypen aus einer Studie mit den entsprechenden Ergebnissen anderer Studien zu vergleichen.

Im Rahmen der Analyse konnten folgende Aspekte mit weiterem Forschungsbedarf identifiziert werden:

- Vergleich der Leistungsfähigkeit der in Deutschland üblicherweise eingesetzten RWBA
- Effekt von RWBA zur Überflutungsminderung bei extremen Starkregenereignissen
- Effekt von RWBA, die gezielt über ihr übliches Bemessungsniveau hinaus erweitert werden

3 Material und Methoden

3.1 Modellgebiete

Die in dieser Arbeit definierten Forschungsziele 1 - 4 (Kapitel 1.2) werden durch Auswertungen von Simulationsergebnissen aus einem Untersuchungsgebiet in der Berliner Innenstadt verfolgt (Kapitel 4). Eine Ausnahme bildet das 5. Forschungsziel, das die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf topografisch ähnliche Einzugsgebiete untersucht (Kapitel 5). Dazu werden zwei benachbarte Einzugsgebiete des Untersuchungsgebiets modelliert und als Validierungsgebiet 1 und 2 bezeichnet. Abbildung 3-1 zeigt die Lage der Modellgebiete und zusätzlich die Flächenanteile je Gebiet in einem Kreisdiagramm. Im Folgenden werden die Eigenschaften der drei Gebiete sowie die vorhandenen Geodaten beschrieben.

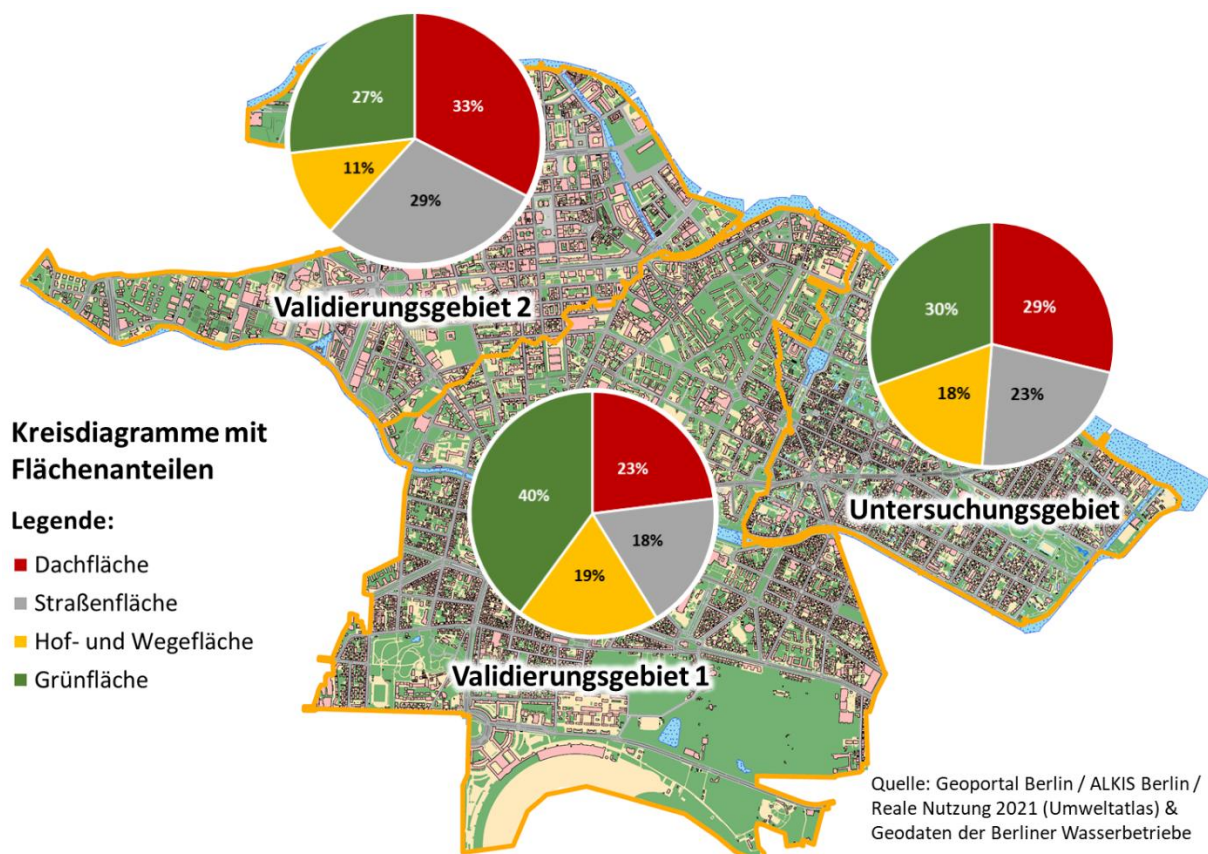


Abbildung 3-1: Lage der Modellgebiete, Abgrenzung über Kanaleinzugsgebiet (orange). Je Gebiet sind die Flächenanteile in einem Kreisdiagramm dargestellt

3.1.1 Untersuchungsgebiet

Abbildung 3-2 zeigt das Untersuchungsgebiet. Es befindet sich in einem dicht besiedelten Innenstadt-Bereich und hat eine Ausdehnung von 3,4 km². Das oberirdische

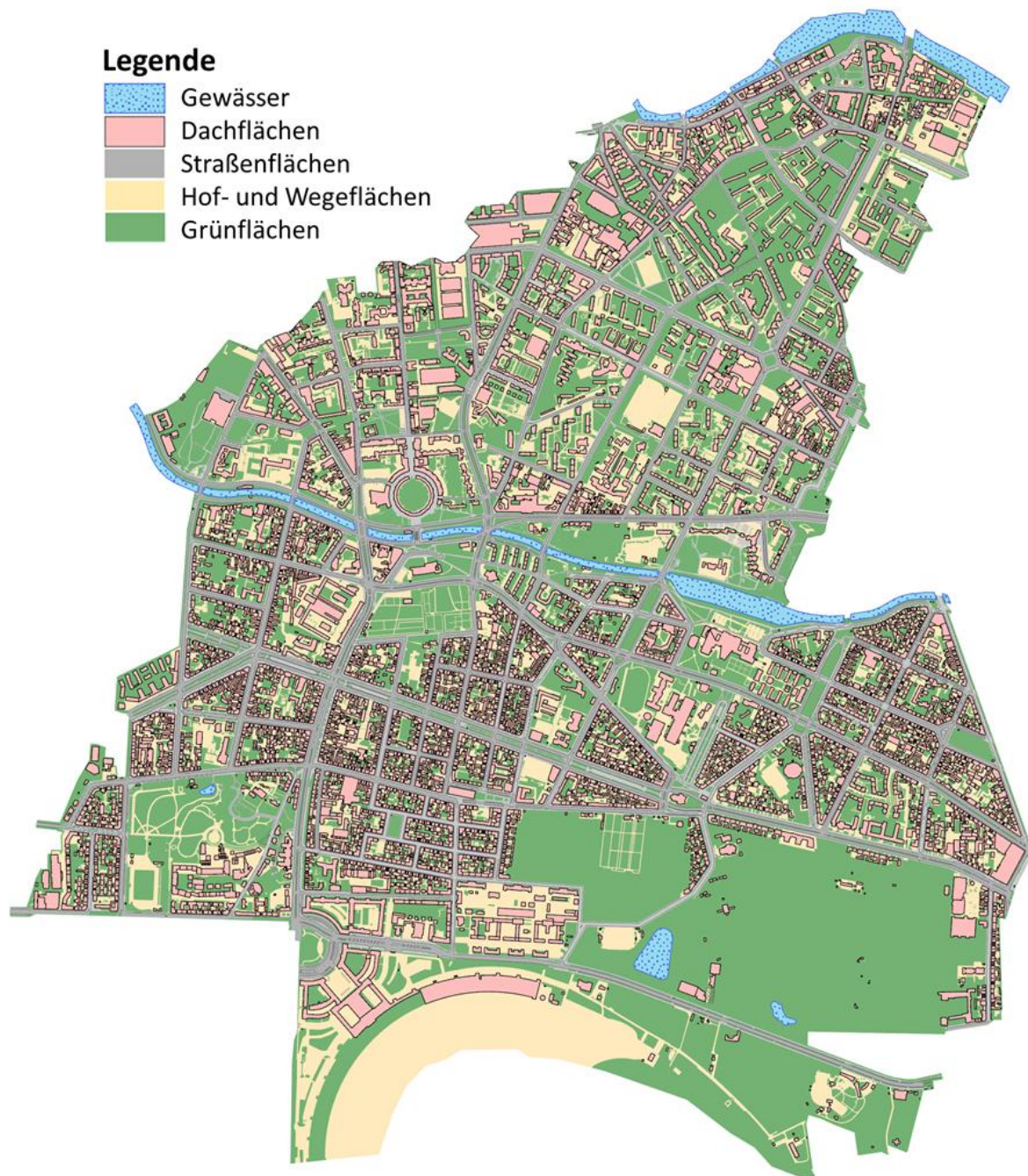
Einzugsgebiet entspricht der Ausdehnung des unterirdischen Kanaleinzugsgebiets, wobei es im Norden, Osten und Süden von einem Gewässer abgegrenzt wird. Für die westliche Abgrenzung des Untersuchungsgebiet wurden die Ergebnisse einer GIS-basierten topografischen Senkenanalyse herangezogen (Kolesch et al. 2022). Bei dieser Analyse hat sich gezeigt, dass die westliche Abgrenzung in etwa entlang von Wasserscheiden oberirdischer Senken verläuft (siehe Anhang A8) und somit als oberirdische Einzugsgebietsgrenze definiert werden kann. Im Untersuchungsgebiet befinden sich 3256 Straßenbäume.



Abbildung 3-2: Untersuchungsgebiet

3.1.2 Validierungsgebiet 1

Abbildung 3-3 zeigt das Validierungsgebiet 1. Es liegt westlich vom Untersuchungsgebiet, hat eine Fläche von 909 ha und einen größeren Grünflächenanteil als das Untersuchungsgebiet.



Quelle: Geoportal Berlin / ALKIS Berlin / Reale Nutzung 2021 (Umweltatlas) & Geodaten der Berliner Wasserbetriebe

Abbildung 3-3: Validierungsgebiet 1

3.1.3 Validierungsgebiet 2

Abbildung 3-4 zeigt das Validierungsgebiet 2. Es liegt nordwestlich vom Validierungsgebiet 2 und hat eine Fläche von 456 ha. Der Flächenanteil der Grünfläche und der Anteil der befestigten Flächen ist ähnlich zum Untersuchungsgebiet.

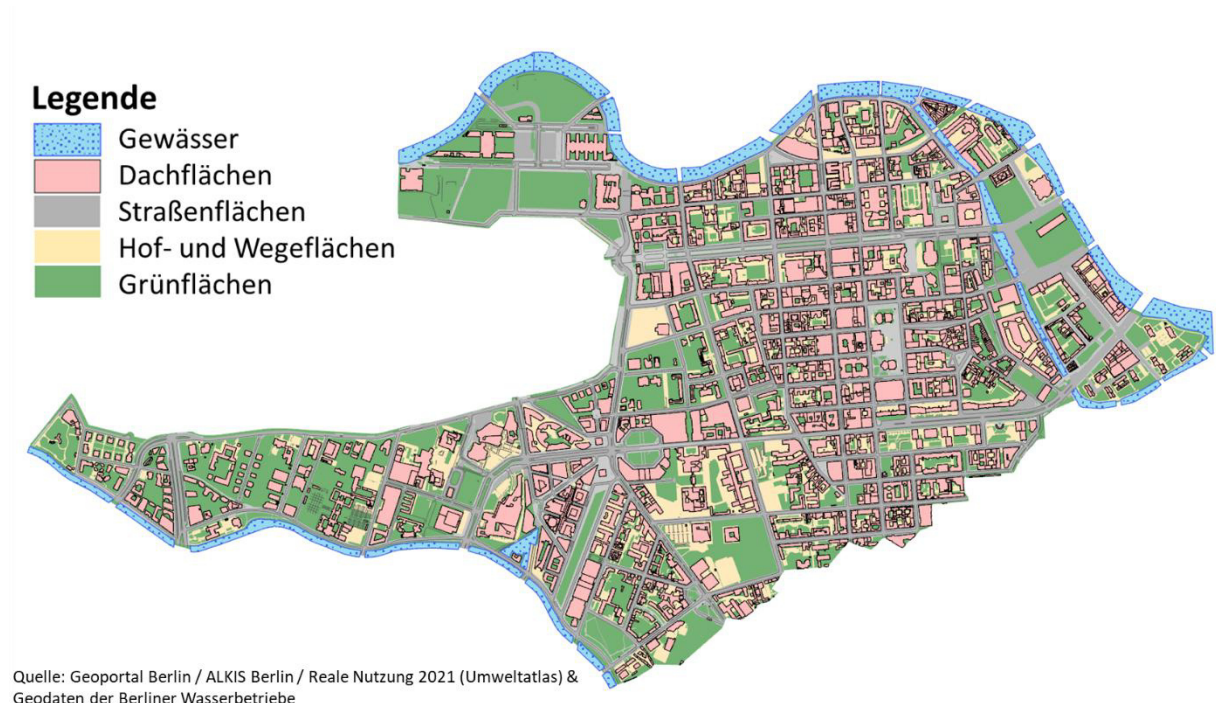


Abbildung 3-4: Validierungsgebiet 2

3.1.4 Datengrundlage

Für die drei Modellgebiete sind identisch aufgebaute Datensätze vorhanden. In Tabelle 3-1 sind die Daten und Datenquellen zusammengestellt, mit denen jeweils das Simulationsmodell aufgebaut wird. Als Datenquelle wird hauptsächlich das fachübergreifendes Informationssystem (FIS-Broker⁵) genutzt, das Geoportal der Stadt Berlin von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen. Der FIS-Broker bietet einen kostenlosen Online-Zugriff auf eine Vielzahl georeferenzierter Daten von Berlin, die laufend aktualisiert werden (SenSBW 2025). Des Weiteren werden Daten von den Berliner Wasserbetrieben (BWB) und dem deutschen Wetterdienst (DWD) genutzt.

⁵ <https://fbinter.stadt-berlin.de/fb/index.jsp>

Tabelle 3-1: Datengrundlage zum Aufbau der Simulationsmodelle in den Modellgebieten

| Datenquelle | Datengrundlage | Datenstand/ -abruf |
|------------------|--------------------------------|--------------------|
| FIS-Broker | Digitales Geländemodell (DGM1) | 09/2022 |
| FIS-Broker ALKIS | Gebäudeflächen | 09/2022 |
| FIS-Broker ALKIS | Hofdurchfahrten | 09/2022 |
| FIS-Broker ALKIS | Straßenflächen | 09/2022 |
| BWB | Hof- und Wegeflächen | 08/2022 |
| FIS-Broker ALKIS | Straßenbruchkanten | 09/2022 |
| BWB | Kanalnetzmodell | 08/2022 |
| BWB | Straßenabläufe | 08/2022 |
| FIS-Broker | Bodenart | 09/2022 |
| FIS-Broker | Straßenbäume | 09/2022 |
| DWD | KOSTRA | 01/2023 |

Für die Abbildung der Topografie im Untersuchungsgebiet wird das digitale Geländemodell benötigt. Seine Auflösung und Güte sind maßgeblich für die Qualität der hydraulischen Modellierung auf der Oberfläche. Für die Modellgebiete stehen die digitale Geländemodelle mit einer Auflösung von 1 x 1 m (DGM1) als 2 x 2 km² Kacheln zu Verfügung.

Die Gebäude-, Straßenflächen und Straßenbruchkanten stammen ebenso wie die Hofdurchfahrten aus dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS). Die Gebäudeflächen bilden die Gebäudegrundrissfläche ab, die Straßenflächen umfassen die Fahrbahn und den Gehwegbereich, abgetrennt durch Straßenbruchkanten. Mit den Hofdurchfahrten sind die Durchfahrtswege durch die Gebäude in die Innenhöfe gemeint.

Zusätzlich wurden als befestigte Flächen die Hof- und Wegeflächen von den BWB bereitgestellt. Sie umfassen die befestigten Flächen der (Innen-)Höfe sowie Wege, die sich außerhalb des Straßenraums befinden. In Abbildung 3-5 sind die verschiedenen Flächen und Straßenbruchkanten für einen Häuserblock im Untersuchungsgebiet dargestellt.



Abbildung 3-5: Darstellung der Straßenflächen (dunkelgrau: Asphalt, hellgrau: Pflaster), Gebäudeflächen (rot), Hof- und Wegeflächen (beige), übrige Fläche (grün) und Straßenbruchkanten (schwarze Linie) eines Häuserblocks im Untersuchungsgebiet. Aus den Gebäudeflächen wurden die Hofdurchfahrten „ausgestanzt“ (Beispiel markiert durch schwarzen Kreis)

Die Kanalnetzmodelle wurden in digitaler Form als InfoWorks ICM Datei (Simulationssoftware) von den BWB bereitgestellt. Sie umfassen die Feinnetze mit Schächten, Haltungen und Sonderbauwerken der Misch- und Trennkanalisationen. Zusätzlich wurde von den BWB die Verortung von den Straßenabläufen bereitgestellt, die in das Modell integriert werden. In Tabelle 3-2 sind die Bestandteile der Kanalnetzmodelle zusammengestellt. Im Modell ist die Einwohneranzahl je Flurstück hinterlegt, auf deren Basis der Schmutzwasserabfluss mithilfe eines Abflussprofils berechnet wird.

Tabelle 3-2: Bestandteile der Kanalnetzmodelle

| Modellgebiet | Schächte | Haltungen | Sonderbauwerke | Straßenabläufe |
|----------------------|----------|-----------|----------------|----------------|
| Untersuchungsgebiet | 1371 | 1619 | 50 | 1802 |
| Validierungsgebiet 1 | 3465 | 3930 | 107 | 4223 |
| Validierungsgebiet 2 | 2835 | 3107 | 73 | 3552 |

Der Datensatz „Bodenart“ des Untersuchungsgebiets wird für die Dimensionierung der Versickerungsanlagen verwendet, der Datensatz „Straßenbäume“ als potentielle Standorte von hydrologisch optimierten Baumstandorten oder Baumrigolen.

Für die Simulationen im Untersuchungsgebiet werden Modellregen auf Basis der KOSTRA-DWD-2020 Daten verwendet (DWD 2023). Das Untersuchungsgebiet befindet sich dabei im Rasterfeld 105190, im Anhang A9 sind die zugehörigen Niederschlagshöhen aufgelistet.

3.2 Modellaufbau

Für die Modellgebiete wird jeweils ein gekoppeltes 1D/2D-Oberflächenabflusssimulationsmodell, in dem das Kanalnetz und die Gebietsoberfläche abgebildet werden, mit der Software InfoWorks ICM (Autodesk, Modellversion 2024.5) aufgebaut. Für den Modellaufbau wird die zuvor beschriebene Datengrundlage verwendet und teilweise modifiziert.

Modifikation der Gebäudeflächen

Aus dem ALKIS-Datensatz *Gebaeude_Bauteile_Flächen* werden die Tiefgaragen und die Bauteile mit Ausnahme der Hofdurchfahrten gelöscht. Die Gebäudegrundrissflächen werden mit den Hofdurchfahrten verschnitten, wobei die Durchfahrten aus den Gebäudeflächen entfernt werden. So kann im Modell berücksichtigt werden, dass im Überflutungsfall gegebenenfalls Wasser aus dem Straßenraum in die Innenhöfe bei geschlossener Blockbebauung fließen kann – oder umgekehrt, aus den Innenhöfen in den Straßenraum.

Abbildung der befestigten Flächen

Zu den befestigten Flächen gehören die Dach-, Straßen- sowie Hof- und Wegeflächen (siehe Abbildung 3-6). Als Dachfläche wird die vollständige Gebäudegrundrissfläche verwendet und als *subcatchment* in das Modell implementiert. Der Niederschlagsabfluss von den Dachflächen wird 1D dem nächstgelegenen Schacht zugeführt. Im Gegensatz dazu wird bei den Straßen sowie Hof- und Wegeflächen die 2D-Oberfläche direkt berechnet. Die Hofdurchfahrten werden ebenfalls 2D abgebildet, allerdings nicht berechnet, weil über ihnen Dachflächen liegen, dennoch können sie überströmt werden.

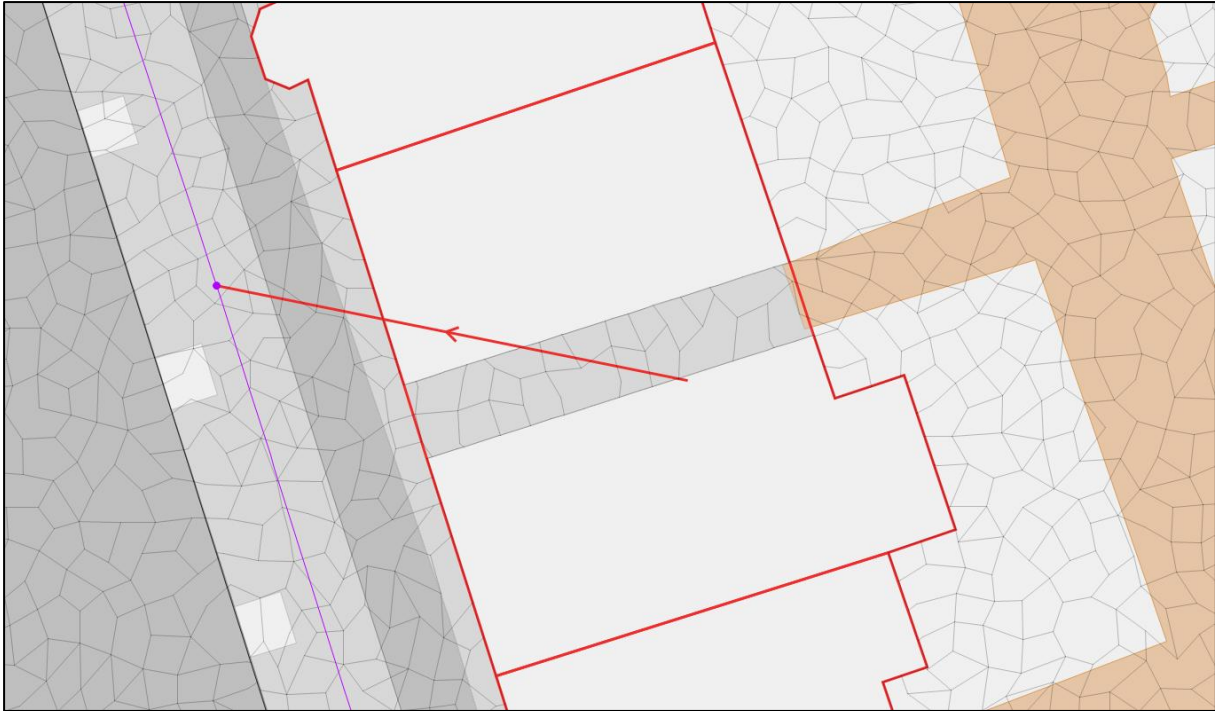


Abbildung 3-6: Darstellung der befestigten Flächen: Dachfläche (rot umrandet) angeschlossen an Schacht (violett), Straßenflächen (dunkelgrau: Asphalt, hellgrau: Pflaster), Hof- und Wegeflächen (beige). Die Hofdurchfahrt (hellgrau) befindet sich mittig in der Dachfläche

In Tabelle 3-3 sind die befestigten Flächen mit gewählten Abfluss- und Rauheitsbeiwerten aufgelistet. Die Abflussbeiwerte orientieren sich an den empfohlenen Spitzenabflussbeiwerten C_s für wasserundurchlässige und teildurchlässige Flächen gemäß DWA-A 138-1 (DWA 2024), die für die Bemessung von Versickerungsanlagen nach dem Einfachen Verfahren vorgesehen sind. Spitzenabflussbeiwerte stellen eine obere Abschätzung der Abflusswirksamkeit von Flächen dar und sind somit eine sinnvolle Annahme im Kontext der Überflutungssimulation. Die Rauheitsbeiwerte stammen aus der Literatur (Hürter 2018).

Tabelle 3-3: Gewählte Abfluss- und Rauheitsbeiwerte der befestigten Flächen

| Fläche | Abflussbeiwert | Rauheitsbeiwerte n |
|------------------------|----------------|----------------------|
| [-] | [-] | $[s/m^{1/3}]$ |
| Dachfläche | 1,0 | 0,0143 |
| Straßenfläche Asphalt | 1,0 | 0,0143 |
| Straßenfläche Pflaster | 0,95 | 0,02 |
| Hof- und Wegefläche | 0,85 | 0,02 |
| Hofdurchfahrt | 0 | 0,02 |

Abbildung der unbefestigten Flächen

Alle Flächen, die keine Dach-, Straßen- oder Hof- und Wegefläche sind, werden als unbefestigte Fläche definiert. Es wird die Annahme getroffen, dass diese unbefestigten Flächen Grünflächen sind. Die Bodenart im gesamten Untersuchungsgebiet ist Mittelsand, somit kann der Infiltrationsprozess der unbefestigten Flächen mit einem einheitlichen Parametersatz modelliert werden. Das Infiltrationsverhalten der Grünflächen und des anstehenden Bodens (Mittelsand) wird mit dem Infiltrationsansatz nach Horton (siehe Kapitel 2.2.1) abgebildet, wobei folgende Parameter verwendet werden:

- Anfangsinfiltration: $f_0 = 127 \text{ mm/h}$
- Endinfiltration: $f_e = 20 \text{ mm/h}$
- Rückgangskonstante: $k_R = 2,0 \text{ 1/h}$

Der Rauheitsbeiwert der Grünflächen wird zu $n = 0,0286 \text{ s/m}^{1/3}$ gesetzt, entsprechend dem Wert für Grünflächen im urbanen Raum nach Hürter (2018).

Erzeugung des Oberflächenmodells

Mit den Höheninformationen des digitalen Geländemodells (DGM1) und den Eigenschaften (Abfluss-, Rauheitsbeiwert, Infiltration) der befestigten und unbefestigten Flächen wird das Oberflächenmodell erzeugt. Die Dachflächen beziehungsweise die Gebäude werden im Oberflächenmodell als *voids* (leere Flächen) dargestellt, für die kein Gitternetz erzeugt wird. Sie sind somit Abflusshindernisse, die nicht überströmt werden können (siehe Abbildung 3-6).

Integration der Straßenabläufe in das Kanalnetz

Im ursprünglich von den BWB übergebenen Kanalnetzmodell sind lediglich die Schächte als Kopplungspunkte zwischen Kanal und Oberfläche enthalten. Hürter (2018) zeigt jedoch, dass Straßenabläufe eine zentrale Modellkomponente für eine realitätsnahe Abbildung des Überflutungsgeschehens darstellen und auch die Modellierung des Kanalaustritts wesentlich beeinflussen. Die Standorte der Straßenabläufe liegen als Punktinformationen vor und werden in das Modell integriert. Ihre Geländeoberkante wird auf die Höhe des digitalen Geländemodells gesetzt, und die Abläufe werden über fiktive Anschlussleitungen mit dem jeweils nächstgelegenen Schacht verbunden.

3.3 Plausibilisierung der Modelle und Einfluss des Kanalnetzes

Plausibilisierung

Aufgrund fehlender Vergleichsdaten konnten die Modelle nicht mit Messdaten oder Bildmaterial vergangener Überflutungsereignisse validiert werden. Allerdings wurden die Modelle analog zum Vorgehen im Forschungsprojekt SENSARE (Kolesch et

al. 2022) aufgebaut, in dem ein 1D/2D-Modell eines Berliner Einzugsgebiets mithilfe von Bildmaterial validiert wurde (Neumann et al. 2021). Das Bildmaterial umfasst Geschwemmsellinien, aus denen die maximalen Wasserstände während eines Starkregenereignisses hervorgehen. Die simulierten maximalen Wasserstände zeigen eine gute Übereinstimmung mit den tatsächlich aufgetretenen Wasserständen.

Es ist davon auszugehen, dass die im Rahmen dieser Arbeit analog aufgebauten Modelle das reale Überflutungsgeschehen ausreichend genau wiedergeben können und somit plausibel sind. Hinzu kommt, dass die Ergebnisse dieser Arbeit auf einem relativen Vergleich des simulierten Überflutungsgeschehens mit und ohne Berücksichtigung von RWBA basieren. Eventuelle Modellungenauigkeiten wirken sich daher auf beide Szenarien gleichermaßen aus und beeinflussen den Vergleich nicht wesentlich.

Vergleich 1D/2D-Modellierungsansatz mit 2D-Ansatz

Im Gegensatz zur 1D/2D-Modellierung wird in einem 2D-Modell ausschließlich der Abfluss an der Oberfläche simuliert, das Kanalnetz bleibt unberücksichtigt. Dies führt dazu, dass das Überflutungsgeschehen tendenziell überschätzt wird – ein wesentlicher Grund dafür, weshalb in dieser Arbeit bewusst ein 1D/2D-Modellierungsansatz gewählt wurde. Abbildung 3-7 zeigt exemplarisch die simulierten maximalen Wasserstände im Überflutungsschwerpunkt des Untersuchungsgebiets bei Anwendung des 1D/2D- und 2D-Ansatzes infolge der Niederschlagsbelastung R1E (T = 100 a, D = 60 min; siehe Kapitel 3.4). Der schwarze Pfeil markiert den tiefsten Punkt im Straßenraum, bei dem im 1D/2D-Modell ein Wasserstand von 0,56 m auftritt und im 2D-Modell von 0,62 m. Vergleicht man das Überflutungsvolumen im Gesamtgebiet (Berechnung siehe Kapitel 3.7) ist der Unterschied zwischen Modellierungsansätzen noch deutlicher: Beim 1D/2D-Ansatz beträgt das Überflutungsvolumen 63.958 m³, beim 2D-Ansatz 123.642 m³ – also rund 93 % mehr. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass das Kanalnetz für die realitätsnahe Abbildung des Überflutungsgeschehens essenziell ist und wenn möglich berücksichtigt werden sollte.

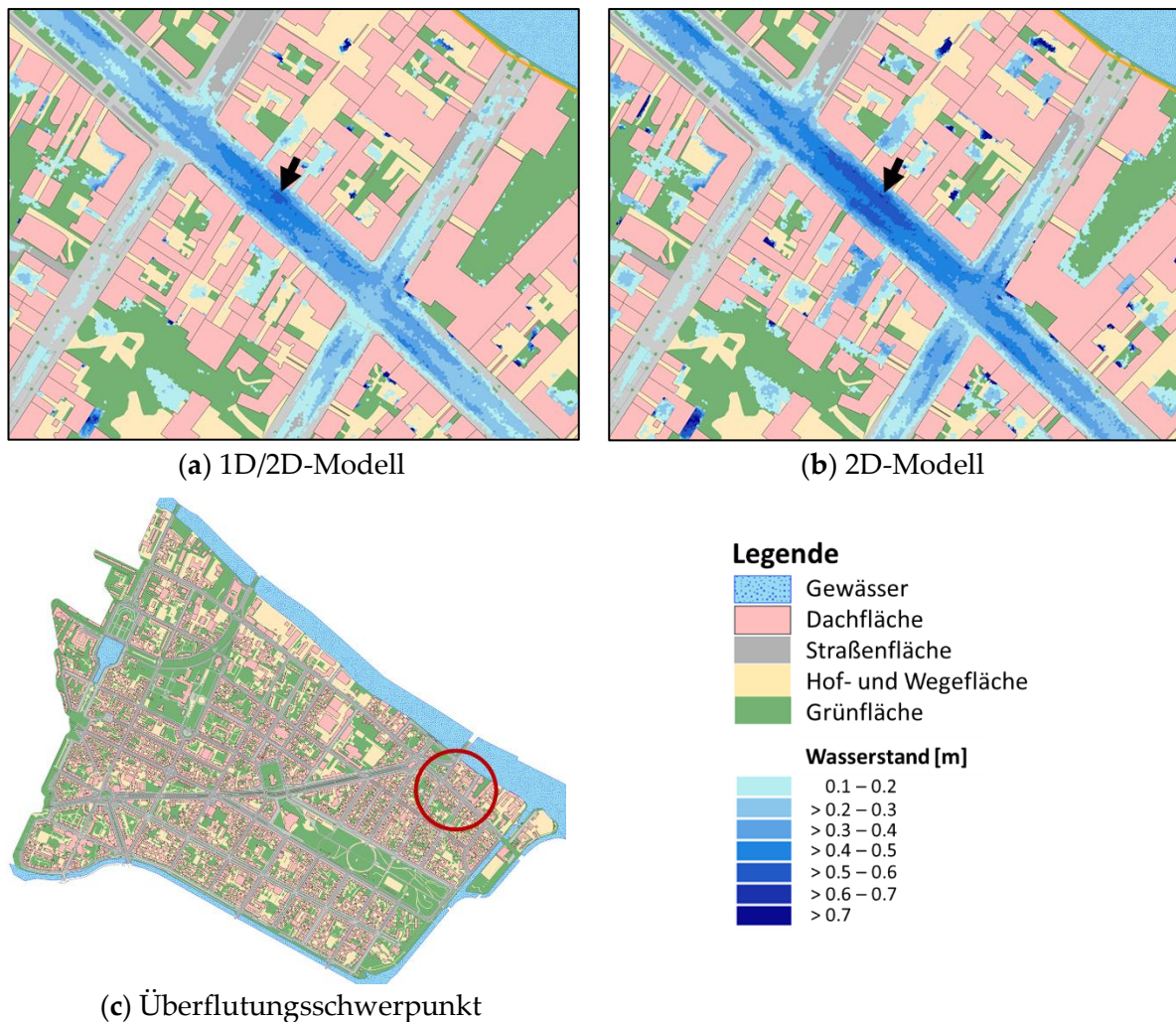


Abbildung 3-7: Vergleich der maximalen Wasserstände infolge R1E (T = 100 a, D = 60 min)

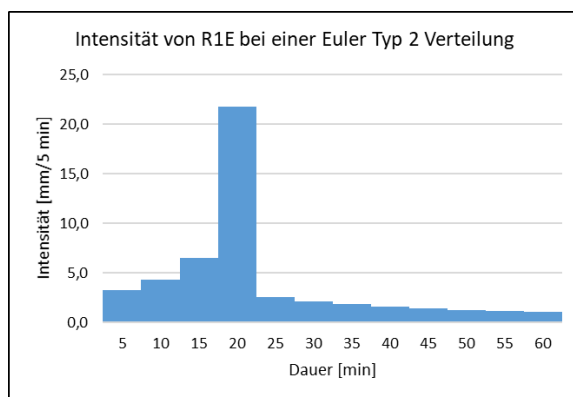
3.4 Niederschlagslastfälle und Szenarien

Als Simulationsinput werden Modell- und Blockregen mit unterschiedlicher Jährlichkeit, Dauer und Niederschlagsverteilung verwendet. In Tabelle 3-4 sind die Eigenschaften der verschiedenen Regen zusammengestellt. Neben der Beschreibung über die Jährlichkeit, Dauer und Niederschlagshöhe ist zur Einordnung zusätzlich der Starkregenindex (SRI) nach Schmitt et al. (2018) gegeben. Die Niederschlagshöhen des jeweilige Regens sind dem KOSTRA-DWD-2020 Datensatz (DWD 2023) für das Rasterfeld 105190 entnommen (siehe Anhang A9). Als Niederschlagsverteilungen werden Euler Typ 2 und Blockregen gewählt, in Abbildung 3-8 ist beispielhaft die Niederschlagsintensität beider Verteilungen dargestellt. Der Euler Typ 2 Regen mit seiner ausgeprägten Intensitätsspitze eignet sich für eine Betrachtung des ungünstigsten Überflutungsszenarios. Für die Bemessung der Versickerungsanlagen, modifizierten Straßenbäumen und Zisternen werden Blockregen mit den Jährlichkeiten T = 5 a und T = 100 a verwendet (R0B und R1B). Für die Effektbewertung der RWBA zur Überflu-

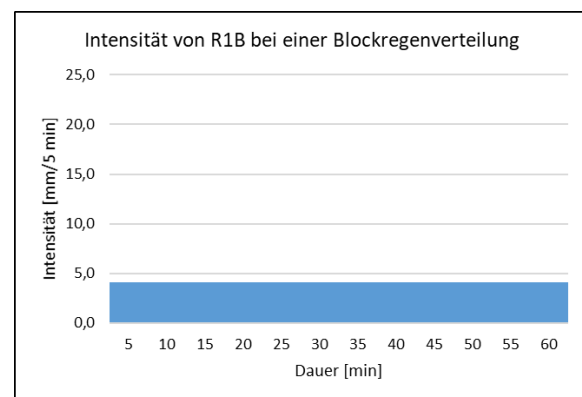
tungsminderung werden außergewöhnliche Starkregen (SRI 7) mit Euler Typ 2 Niederschlagsverteilungen verwendet, wobei die Dauerstufen $D = 60$ min und 360 min simuliert werden (R1E und R1E6). Zusätzlich wird ein extremer Starkregen (SRI 10) mit einer Niederschlagshöhe von 100 mm verwendet (R2E).

Tabelle 3-4: Eigenschaften der als Simulationsinput verwendeten Modellregen

| Bezeichnung | Verteilung | Jährlichkeit | Dauer | Niederschlagshöhe | SRI |
|-------------|-------------|--------------|-------|-------------------|-----|
| | | [a] | [min] | [mm] | [-] |
| R0B | Blockregen | 5 | 60 | 25 | 2 |
| R1B | Blockregen | 100 | 60 | 48,9 | 7 |
| R1E | Euler Typ 2 | 100 | 60 | 48,9 | 7 |
| R1E6 | Euler Typ 2 | 100 | 360 | 74,3 | 7 |
| R2E | Euler Typ 2 | >> 100 | 60 | 100 | 10 |



(a)



(b)

Abbildung 3-8: Intensität bei einer (a) Euler Typ 2 Verteilung und (b) Blockregenverteilung für R1E und R1B

Die Wirksamkeit der RWBA zur Starkregenvorsorge wird anhand unterschiedlicher Szenarien untersucht, wobei hauptsächlich der Implementierungsgrad der Anlagentypen angepasst wird. Im Modell wird der Niederschlagsabfluss der Dachflächen durch die Versickerungsanlagen, Zisternenarten und Gründächer bewirtschaftet. Ein Implementierungsgrad von 100 % bedeutet, dass z. B. alle Dachflächen an Mulden angeschlossen sind oder alle Dächer als Gründächer ausgeführt werden. Für das Untersuchungsgebiet mit einer Gebietsfläche von 339,7 ha und 97,8 ha Dachfläche ergibt sich (bei einem Implementierungsgrad von 100 %) der Bewirtschaftungsanteil zu 28,8 % in Bezug auf die Gesamtgebietsfläche:

$$\frac{97,8 \text{ ha Dachfläche}}{339,7 \text{ ha Gesamtgebietsfläche}} = 28,8 \% \text{ Bewirtschaftungsanteil}$$

Im Gegensatz zu den anderen Anlagentypen wird an die modifizierten Straßenbäume Straßenfläche statt Dachfläche angeschlossen (siehe Kapitel 3.6.1). Bei einem Implementierungsgrad von 100 % (alle 3256 Straßenbäume im Untersuchungsgebiet als hydrologisch optimierte Baumstandorte (HOB) oder Baumrigolen ausgeführt) kann an die HOB in Summe 25,4 ha und an die Baumrigolen 39,1 ha Straßenfläche angeschlossen werden (siehe Kapitel 3.6.1). In Bezug auf die 339,7 ha Gesamtgebietsfläche ergeben sich für die HOB und Baumrigolen Bewirtschaftungsanteile von 7,5 % und 11,5 %. Diese geringeren Bewirtschaftungsanteile im Vergleich zu den anderen Anlagen (Bewirtschaftungsanteil 28,8 %) müssen beim Leistungsvergleich der verschiedenen RWBA berücksichtigt werden.

In Tabelle 3-5 sind die Szenarien aufgelistet, die simuliert werden. Die Spalten der Tabelle, die die Szenarien „R1E und R2E“ enthalten, umfassen zwei Szenarien für das Referenzmodell. Für jede der Anlagen gibt es jeweils 8 Szenarien, die sich aus den Niederschlagsbelastungen mit den Implementierungsgraden von 25 %, 50 %, 75 % und 100 % ergeben.

In Summe wurden über 169 Szenarien auf einem PC mit einem 6-Kern-Prozessor (i5-9600K), 32 GB RAM (DDR4) und einer dedizierten Grafikkarte (RTX 2070) simuliert, wobei die Rechenzeit etwa dem 2- bis 2,5-Fachen der Regendauer entsprach.

Tabelle 3-5: Anzahl der simulierten Szenarien

| Gebiet Modell/RWBA | R1E und R2E | | R1B | | R1E6 | |
|-------------------------------------|-----------------|------------|-----------------|-------|-----------------|-------|
| | Implementierung | | Implementierung | | Implementierung | |
| | 0 % | 25 - 100 % | 0 % | 100 % | 0 % | 100 % |
| Untersuchungsgebiet | | | | | | |
| Referenzmodell | 2 | - | 1 | - | 1 | - |
| Mulden 5 a | - | 8 | - | 1 | - | 1 |
| Mulden 100 a | - | 8 | - | 1 | - | 1 |
| Rigolen 5 a | - | 8 | - | 1 | - | 1 |
| Rigolen 100 a | - | 8 | - | 1 | - | 1 |
| MRE 5 a | - | 8 | - | 1 | - | 1 |
| MRE 100 a | - | 8 | - | 1 | - | 1 |
| Ext. Gründächer | - | 8 | - | 1 | - | 1 |
| Int. Gründächer | - | 8 | - | 1 | - | 1 |
| Retentionsdächer | - | 8 | - | 1 | - | 1 |
| Zisternen | - | 8 | - | 1 | - | 1 |
| Retentionszisternen ungedrosselt | - | 8 | - | 1 | - | 1 |
| Retentionszisternen gedrosselt | - | 8 | - | 1 | - | 1 |
| HOB | - | nur 100 % | - | 1 | - | 1 |
| Baumrigolen | - | nur 100 % | - | 1 | - | 1 |
| Validierungsgebiete | | | | | | |
| Referenzmodell | 4 | - | - | - | - | - |
| Mulden 5 a | - | 16 | - | - | - | - |
| Mulden 100 a | - | 16 | - | - | - | - |
| Retentionsdächer | - | 16 | - | - | - | - |

3.5 Aufbau, Dimensionierung und Modellparameter der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen

Im Modell werden die RWBA mit den SUDS-Elementen abgebildet. Eine grundsätzliche Beschreibung eines SUDS-Elements und die zugehörigen Modellierungsansätze sind in Kapitel 2.4 beschrieben. In diesem Kapitel werden der Aufbau, die Dimensionierung und die Auswahl der Modellparameter erläutert.

3.5.1 Versickerungsanlagen

Es werden die Versickerungsanlagen Mulden, Rigolen und Mulden-Rigolen-Elemente untersucht. Zunächst wird das SUDS-Element vorgestellt, mit dem die jeweilige Anlage modelliert wird. Anschließend wird eine Vordimensionierung der Anlagengröße bei einer angeschlossenen abflusswirksamen Fläche von 1000 m² nach DWA-A 138-1 (DWA 2024) durchgeführt und die ermittelte Anlagengröße mit der angeschlossenen Fläche im Modell abgebildet. Im Modell werden Simulationen durchgeführt und anhand der Ergebnisse die Anlagengröße angepasst. Das Ziel dabei ist, dass ein Überlauf aus der Anlage erst bei einem Ereignis mit einer Wiederkehrzeit größer als der Bemessungsjährlichkeit auftritt. Zuletzt wird der endgültige Parametersatz festgelegt.

3.5.1.1 Versickerungsmulde

Im Modell wird die Versickerungsmulde mit dem SUDS-Element *rain garden* abgebildet, dessen Aufbau in Abbildung 3-9 dargestellt ist. In der Oberflächenschicht wird die eingetiefte Mulde modelliert, während in der Bodenschicht der unter der Mulde anstehende Boden dargestellt wird. Da der Fokus auf einzelnen Starkregenereignissen liegt, wird die Evapotranspiration vernachlässigt.

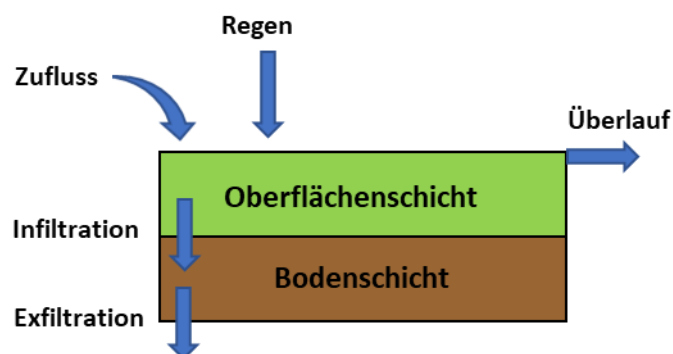


Abbildung 3-9: Aufbau des SUDS-Elements *rain garden* zur Abbildung der Versickerungsmulde

Vordimensionierung

Die Vordimensionierung der Versickerungsmulde wird nach dem Einfachen Verfahren gemäß DWA-A 138-1 (DWA 2024) durchgeführt (siehe Kapitel 2.3.1.1). Die Mulde wird für eine Jährlichkeit von $T = 5$ a bemessen. Die Dimensionierung für $T = 100$ a erfolgt mit den abschließend festgelegten Modellparametern. Als Niederschlagsbelastung werden die KOSTRA-Daten für den Standort Berlin Friedrichshain-Kreuzberg (siehe Anhang A9) als Blockregen ausgewählt. Die Bemessungsgrößen sowie die maßgebliche mittlere Versickerungsfläche $A_{S,m}$ (Gleichung (7)) sind in Tabelle 3-6 dargestellt. Der f_z -Faktor (Gleichung (1)) wird zu 1 gesetzt, da zunächst das Überlaufverhalten der Mulde im Modell für die gewählte Bemessungsjährlichkeit untersucht werden soll, ohne Berücksichtigung des Zuschlagfaktors. Im Untersuchungsgebiet steht Mittelsand an, weshalb ein k_f -Wert von $6,5 \cdot 10^{-5}$ m/s angesetzt wird (der k_f -Wertebereich von Mittelsand wird im Arbeitsblatt DWA-A 138-1 mit $k_f = 5 \cdot 10^{-5}$ bis $8 \cdot 10^{-5}$ m/s angegeben). Der k_i -Wert (Gleichung (5)) wird in Anlehnung an DWA-A 138 (DWA, 2005) zu $k_i = 0,5 \cdot k_f$ festgelegt, da keine genauen Informationen zum Ermittlungsverfahren des k_f -Werts vorliegen (siehe 2.3.1).

Tabelle 3-6: Vordimensionierung der Versickerungsmulden gemäß DWA-A 138-1 (DWA 2024)

| AC [m ²] | k_i [m/s] | h_M [m] | f_z [-] | $A_{S,m}$ [m ²] bei T = 5 a |
|-------------------------|----------------------|--------------|--------------|--|
| 1000 | $3,25 \cdot 10^{-5}$ | 0,3 | 1 | 63,8 |

Abbildung im Modell

Im nächsten Schritt werden die Versickerungsmulde und die angeschlossene befestigte Fläche im Modell abgebildet. Die angeschlossene befestigte Fläche umfasst 1000 m², ist zu 100 % abflusswirksam und komplett an die Versickerungsmulde angeschlossen. Als Muldenfläche wird die mittlere Versickerungsfläche gewählt, die bei der Vordimensionierung mit dem Einfachen Verfahren ermittelt wurde. Die Modellparameter des SUDS-Elements *rain garden* sind in Tabelle 3-7 dargestellt. Die Bodenparameter entsprechen den Standardwerten, die im Modell für die im Modellgebiet anstehende Bodenart Sand vorgegeben sind, wobei die Sickerrate (*seepage rate*) gleich der hydraulischen Leitfähigkeit (*conductivity*) von Sand gesetzt wird. Es wird von einer Anfangssättigung (*initial saturation*) des Bodens von 50 % ausgegangen.

Tabelle 3-7: Modellparameter des SUDS-Elements *rain garden* zur Abbildung der Versickerungsmulde (Anfangskonfiguration)

| Schicht | Bezeichnung | Wert | Einheit |
|---------------------|--|--------|--------------------|
| Oberfläche | <i>Berm height</i> | 300 | mm |
| | <i>Vegetation volume fraction</i> | 0,1 | |
| | <i>Surface roughness (Manning's n)</i> | 0,2 | s/m ^{1/3} |
| | <i>Surface slope</i> | 0,02 | m/m |
| Boden | <i>Soil class</i> | Sand | |
| | <i>Soil thickness</i> | 500 | mm |
| | <i>Soil porosity</i> | 0,437 | |
| | <i>Field capacity</i> | 0,062 | |
| | <i>Wilting point</i> | 0,024 | |
| | <i>Conductivity</i> | 120,4 | mm/h |
| | <i>Conductivity slope</i> | 48 | |
| | <i>Suction head</i> | 49,022 | mm |
| <i>Seepage rate</i> | 120,4 | mm/h | |

Anpassung der Anlagengröße und der Modellparameter

Mit der beschriebenen Systemkonfiguration werden im Modell Simulationen durchgeführt (auf Basis der KOSTRA-Daten der Vordimensionierung) und untersucht, ab welcher Jährlichkeit ein Muldenüberlauf stattfindet. Ziel ist es, dass ein Muldenüberlauf im Modell erst ab einer Jährlichkeit auftritt, die größer ist als die Bemessungsjährlichkeit aus der Vordimensionierung, die Mulde aber gleichzeitig nicht überdimensioniert ist. Dazu werden in zwei unterschiedlichen Ansätzen entweder der k_i -Wert und somit die Anlagengröße angepasst oder die vorgegebenen Standardwerte der Bodenart Sand im Modell geändert. Die Anpassung der Anlagengröße wird nur für die auf $T = 5$ a dimensionierte Mulde durchgeführt und die Ergebnisse werden auf die für $T = 100$ a bemessene Mulde übertragen.

Anfangskonfiguration

In Tabelle 3-8 sind Parameter aus der Vordimensionierung und dem Modell gegeben. Die Muldengröße im Modell entspricht der in der Vordimensionierung bestimmten mittleren Versickerungsfläche $A_{S,m}$. Tabelle 3-9 zeigt die Simulationsergebnisse mit den Werten der Anfangskonfiguration und einer Simulationsdauer von 75 min (15 min länger als Bemessungsregendauer, um die Fließzeit zu berücksichtigen). Der Endspeicher gibt die Füllung des SUDS-Elements bei Simulationseende an. Entscheidend ist dabei der Muldenüberlauf, der ab einer Jährlichkeit von $T = 7$ a auftritt. Somit ist die Mulde im Modell leicht überdimensioniert.

Tabelle 3-8: Parameter der Versickerungsmulde (Anfangskonfiguration)

| Vordimensionierung auf T = 5 a | | | Modell | |
|--------------------------------|-------------------------|--------|----------------------------|--------|
| $A_{S,m}$ | $k_i (= 0,5 \cdot k_f)$ | | hydraulische Leitfähigkeit | |
| [m ²] | [m/s] | [mm/h] | [m/s] | [mm/h] |
| 63,8 | $3,25 \cdot 10^{-5}$ | 117 | $3,34 \cdot 10^{-5}$ | 120,4 |

Tabelle 3-9. Simulationsergebnisse mit Anfangskonfiguration bei einer Blockregenbelastung von T = 7 a, D = 60 min

| Zufluss | Versickerung | Überlauf | Anfangsspeicher | Endspeicher | Vol. Fehler |
|---------|--------------|----------|-----------------|-------------|-------------|
| [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [%] |
| 447,04 | 83,9 | 8,87 | 115,25 | 471,53 | - 0,36 |

Da die Mulde im Modell leicht überdimensioniert ist, kann entweder die bemessungsrelevante Infiltrationsrate bei der Vordimensionierung erhöht werden (Anpassung des k_i -Werts), was zu einer Verkleinerung der Muldenfläche führt. Alternativ können auch Bodenparameter wie die hydraulische Leitfähigkeit im Modell verringert werden, wodurch sich die Versickerungsfähigkeit der Mulde reduziert. Im Folgenden werden die Ergebnisse beider Ansätze beschrieben und anschließend diskutiert.

Anpassung k_i -Wert (neue Vordimensionierung nach DWA-A 138-1)

Durch die Erhöhung des k_i -Werts bei der Vordimensionierung verkleinert sich die erforderliche Muldenfläche. In Tabelle 3-10 sind die veränderten Parameter gegeben, wenn k_f zu $7,5 \cdot 10^{-5}$ m/s gewählt wird. Diese Annahme ist zulässig, da der k_f -Wert weiterhin im Wertebereich für Mittelsand gemäß DWA-A 138-1 (DWA 2024) liegt. Tabelle 3-11 zeigt die Simulationsergebnisse mit einer Niederschlagsbelastung von T = 6 a, D = 45 min, bei der erstmalig ein Muldenüberlauf auftritt. Die maßgebende Regendauer von D = 45 min ergibt sich aus der Muldendimensionierung. Durch die leichte Anpassung des k_i -Werts und die daraus resultierende Verkleinerung der Mulde wird das Ziel der Anpassung erreicht.

Tabelle 3-10: Anpassung des k_i -Werts

| Vordimensionierung auf T = 5 a | | | Modell | |
|--------------------------------|-------------------------|--------|----------------------------|--------|
| $A_{S,m}$ | $k_i (= 0,5 \cdot k_f)$ | | hydraulische Leitfähigkeit | |
| [m ²] | [m/s] | [mm/h] | [m/s] | [mm/h] |
| 61,4 | $3,75 \cdot 10^{-5}$ | 135 | $3,34 \cdot 10^{-5}$ | 120,4 |

Tabelle 3-11: Simulationsergebnisse mit angepassten k_i -Wert bei einer Blockregenbelastung von $T = 6$ a, $D = 45$ min.

| Zufluss | Versickerung | Überlauf | Anfangsspeicher | Endspeicher | Vol. Fehler |
|---------|--------------|----------|-----------------|-------------|-------------|
| [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [%] |
| 413,98 | 57,54 | 2,79 | 115,25 | 470,9 | - 0,38 |

Anpassung der hydraulischen Leitfähigkeit im Modell

In Tabelle 3-12 sind die Parameter bei einer Verkleinerung der hydraulischen Leitfähigkeit im Modell gegeben. Der k_i -Wert und damit auch die Muldenfläche bleiben unverändert gegenüber der Anfangskonfiguration. Die hydraulische Leitfähigkeit wird auf 115 mm/h reduziert. In Tabelle 3-13 sind die Simulationsergebnisse für eine Niederschlagsbelastung von $T = 6$ a und $D = 60$ min dargestellt, bei der es nach der Anpassung der hydraulischen Leitfähigkeit erstmals zu einem Muldenüberlauf kommt. Durch die leichte Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit im Modell wird das Ziel erreicht, dass erst ab der Jährlichkeit größer der Bemessungsjährlichkeit ein Überlauf auftritt.

Tabelle 3-12: Anpassung der hydraulischen Leitfähigkeit im Modell

| Vordimensionierung auf $T = 5$ a | | | Modell | |
|----------------------------------|-------------------------|--------|----------------------------|--------|
| $A_{S,m}$ | $k_i (= 0,5 \cdot k_i)$ | | hydraulische Leitfähigkeit | |
| [m ²] | [m/s] | [mm/h] | [m/s] | [mm/h] |
| 63.8 | $3,25 \cdot 10^{-5}$ | 117 | $3,19 \cdot 10^{-5}$ | 115 |

Tabelle 3-13: Simulationsergebnisse mit angepasster hydraulischer Leitfähigkeit bei einer Blockregenbelastung von $T = 6$ a, $D = 60$ min

| Zufluss | Versickerung | Überlauf | Anfangsspeicher | Endspeicher | Vol. Fehler |
|---------|--------------|----------|-----------------|-------------|-------------|
| [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [%] |
| 430,7 | 77,4 | 0,39 | 115,25 | 470,08 | - 0,35 |

Fazit und festgelegte Modellparameter

Bereits ohne Anpassung des k_i -Werts und somit der Muldenfläche zeigt sich eine gute Übereinstimmung des Überlaufverhaltens der nach DWA-A 138-1 dimensionierten Mulden und der modellierten Mulden. Eine Anpassung ist nicht unbedingt notwendig.

Mit nur kleinen Anpassungen des k_i -Werts oder der hydraulischen Leitfähigkeit wird die Zielsetzung erreicht, dass im Modell erst ab einer Jährlichkeit größer der Bemessungsjährlichkeit ein Überlauf auftritt.

sungsjährlichkeit ein Muldenüberlauf auftritt, die Mulde aber auch nicht überdimensioniert ist. Grundsätzlich muss entschieden werden, ob der k_i -Wert oder die hydraulische Leitfähigkeit angepasst wird.

- Im Arbeitsblatt DWA-A 138-1 wird die bemessungsrelevante Infiltrationsrate (k_i -Wert) vereinfachend als konstant angenommen. Sie wird aus dem Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert) des Bodens unter wassergesättigten Verhältnissen ermittelt ($k_i \leq k_f$). Die bemessungsrelevante Infiltrationsrate ist die einzige Größe zur Abbildung des Infiltrationsprozesses. (DWA 2024)
- Im Modell wird der Infiltrationsprozess komplexer nach Green-Ampt (2-12) abgebildet. Die hydraulische Leitfähigkeit entspricht der wassergesättigten Leitfähigkeit, wobei bei der Berechnung nach gesättigter und ungesättigter Zone unterschieden wird und auch der Einfluss des eingestauten Wassers auf die Infiltration mit einbezogen wird. Neben der hydraulischen Leitfähigkeit wird unter anderem auch die Dicke der Bodenschicht, die Porosität, die Feldkapazität sowie der Welkepunkt des Bodens berücksichtigt (detaillierte Beschreibung in Kapitel 2.4).

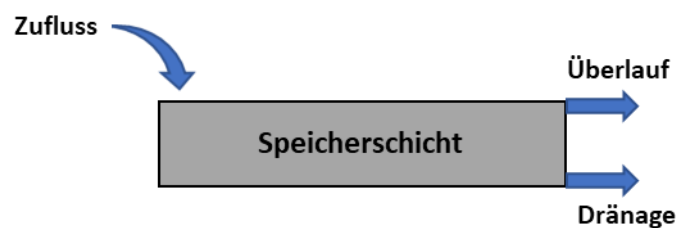
Es ist anzunehmen, dass das Modell die Vorgänge in der Versickerungsmulde realitätsnäher abbildet. Deshalb wird der angepasste k_i -Wert von $3,75 \cdot 10^{-5}$ m/s zur Dimensionierung herangezogen und die Modellparameter aus der Anfangskonfiguration gewählt. In Tabelle 3-14 sind die festgelegten Modellparameter sowie die Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der Mulden aufgelistet. Die Anlagenfläche der auf $T = 5$ a bemessenen Mulde beträgt $66,2 \text{ m}^2$ (statt $61,4 \text{ m}^2$ wie in Tabelle 3-10), da für die Dimensionierung noch der f_z -Faktor mit 1,1 berücksichtigt wird.

Tabelle 3-14: Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der auf T = 5 a und 100 a bemessenen Versickerungsmulden

| Modellparameter | | | Dimensionen und Einstellungen | | |
|---------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------|
| Bezeichnung | Wert | Einheit | Bezeichnung | Wert | Einheit |
| <i>Berm height</i> | 300 | mm | Anlagenfläche T = 5 a | 66,2 | m ² |
| <i>Vegetation vol. fraction</i> | 0,1 | | Anlagenfläche T = 100 a | 138,2 | m ² |
| <i>Surface roughness</i> | 0,2 | s/m ^{1/3} | k _i -Wert | 3,75·10 ⁻⁵ | m/s |
| <i>Surface slope</i> | 0,02 | m/m | AC | 1000 | m ² |
| <i>Soil class</i> | Sand | | fz | 1,1 | |
| <i>Soil thickness</i> | 500 | mm | Anfangssättigung des Bodens | 50 | % |
| <i>Soil porosity</i> | 0,437 | | | | |
| <i>Field capacity</i> | 0,062 | | | | |
| <i>Wilting point</i> | 0,024 | | | | |
| <i>Conductivity</i> | 120,4 | mm/h | | | |
| <i>Conductivity slope</i> | 48 | | | | |
| <i>Suction head</i> | 49,022 | mm | | | |
| <i>Seepage rate</i> | 120,4 | mm/h | | | |

3.5.1.2 Rigole

Im Modell wird die Rigole mit dem SUDS-Element *rain barrel* abgebildet, dessen Aufbau in Abbildung 3-10 dargestellt ist. Die Speicherschicht bildet den Rigolenkörper ab, die Dränage steuert die Exfiltration aus dem Rigolenkörper in den anstehenden Boden. Ist der Rigolenkörper vollständig gefüllt, kommt es zu einem Überlauf.

Abbildung 3-10: Aufbau des SUDS-Elements *rain barrel* zur Abbildung der Rigole

Vordimensionierung

Die Vordimensionierung der Rigole (Gleichung (10)) wird analog zur Mulde durchgeführt. Die gewählten Bemessungsgrößen sowie die maßgebliche Rigolenfläche sind in Tabelle 3-15 dargestellt. Für die Vordimensionierung wird der festgelegte k_i-Wert von 3,75·10⁻⁵ m/s aus der Muldendimensionierung übernommen. Der Speicherkoeffizient s_R der Rigole wird zu 0,9 gewählt (entspricht einem effektiven Speichervolumen von

90 %), die Anfangssättigung (*initial saturation*) zu 0 %, da ansonsten die Rigole bei Simulationsbeginn schon einen entsprechenden prozentualen Füllgrad aufweisen würde.

Tabelle 3-15: Vordimensionierung der Rigole gemäß DWA-A 138-1 (DWA, 2020)

| AC | k_i | f_z | L_R | b_R | h_R | s_R | $A_{S,m}$ [m ²] bei |
|-------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|
| [m ²] | [m/s] | [-] | m | m | m | [-] | T = 5 a |
| 1000 | $3,75 \cdot 10^{-5}$ | 1 | 5,97 | 5,97 | 0,6 | 0,9 | 35,6 |

Anpassung der Anlagengröße

In Tabelle 3-16 sind die Simulationsergebnisse der auf T = 5 a dimensionierten Rigole bei einer Blockregenbelastung von T = 7 a, D = 60 min und einer Simulationsdauer von 75 min gegeben, bei der erstmalig ein Überlauf aus der Rigole stattfindet. Das Bemessungsziel wird nicht erreicht.

Tabelle 3-16: Simulationsergebnisse der Rigole bei einer Blockregenbelastung von T = 7 a, D = 60 min

| Zufluss | Versickerung | Überlauf | Anfangsspeicher | Endspeicher | Vol. Fehler |
|---------|--------------|----------|-----------------|-------------|-------------|
| [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [%] |
| 753 | 147,89 | 27,33 | 0 | 579,79 | - 0,27 |

Zur Anpassung der Rigole wird bei der Vordimensionierung der k_i -Wert auf $3,8 \cdot 10^{-5}$ m/s erhöht, wodurch sich die Rigolenfläche verringert. In Tabelle 3-17 sind die Simulationsergebnisse dargestellt. Dabei tritt erstmals ein Überlauf aus der Rigole auf, das Bemessungsziel wird erreicht.

Tabelle 3-17: Simulationsergebnisse der Rigole mit angepassten k_i -Wert bei einer Blockregenbelastung von T = 6 a, D = 60 min

| Zufluss | Versickerung | Überlauf | Anfangsspeicher | Endspeicher | Vol. Fehler |
|---------|--------------|----------|-----------------|-------------|-------------|
| [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [%] |
| 727,52 | 147,82 | 1,95 | 0 | 579,76 | - 0,28 |

Festgelegte Modellparameter

Für die Vordimensionierung der Rigole wird der k_i -Wert zu $3,8 \cdot 10^{-5}$ m/s gewählt. In Tabelle 3-18 sind die festgelegten Modellparameter sowie die Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der auf T = 5 a bemessenen Rigole aufgelistet, in Tabelle 3-19 die Werte der auf T = 100 a bemessenen Rigole.

Tabelle 3-18: Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der auf T = 5 a bemessenen Rigole

| Modellparameter | | | Dimensionen und Einstellungen | | |
|--------------------------------|-------|---------|-------------------------------|----------------------|----------------|
| Bezeichnung | Wert | Einheit | Bezeichnung | Wert | Einheit |
| <i>Storage thickness</i> | 600 | mm | Anlagenfläche T = 5 a | 38,2 | m ² |
| <i>Storage void ratio</i> | 9 | | ki-Wert | 3,8·10 ⁻⁵ | m/s |
| <i>Seepage rate</i> | 0 | mm/h | AC | 1000 | m ² |
| <i>Storage clogging factor</i> | 0 | | fz | 1,1 | |
| <i>Coefficient for flow</i> | 120,4 | mm/h | L _R | 6,182 | m |
| <i>Flow exponent</i> | 0 | | b _R | 6,182 | m |
| <i>Offset height</i> | 0 | mm | h _R | 0,6 | m |
| | | | s _R | 0,9 | |
| | | | Anfangsfüllung der Rigole | 0 | % |

Tabelle 3-19: Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der auf T = 100 a bemessenen Rigole

| Modellparameter | | | Dimensionen und Einstellungen | | |
|--------------------------------|-------|---------|-------------------------------|----------------------|----------------|
| Bezeichnung | Wert | Einheit | Bezeichnung | Wert | Einheit |
| <i>Storage thickness</i> | 600 | mm | Anlagenfläche T = 100 a | 75,6 | m ² |
| <i>Storage void ratio</i> | 9 | | ki-Wert | 3,8·10 ⁻⁵ | m/s |
| <i>Seepage rate</i> | 0 | mm/h | AC | 1000 | m ² |
| <i>Storage clogging factor</i> | 0 | | fz | 1,1 | |
| <i>Coefficient for flow</i> | 120,4 | mm/h | L _R | 8,697 | m |
| <i>Flow exponent</i> | 0 | | b _R | 8,697 | m |
| <i>Offset height</i> | 0 | mm | h _R | 0,6 | m |
| | | | s _R | 0,9 | |
| | | | Anfangsfüllung der Rigole | 0 | % |

3.5.1.3 Mulden-Rigolen-Element

Im Modell wird das Mulden-Rigolen-Element (MRE) mit dem SUDS-Element *infiltration trench* abgebildet, dessen Aufbau in Abbildung 3-11 dargestellt ist. In der Oberflächenschicht wird die eingetiefte Mulde und in der Speicherschicht der Rigolenkörper modelliert. Mit dem Element *bio-retention cell* könnte zusätzlich die dazwischenliegende Bodenschicht abgebildet werden, allerdings nicht der direkte Überlauf von der

Mulde in die Rigole über ein Entlastungsrohr. Der direkte Überlauf kann nur mit dem SUDS-Element *infiltration trench* modelliert werden, bei dem keine Bodenschicht berücksichtigt wird. Im Modell infiltriert das Wasser aus der Mulde direkt in die Rigole, um den Effekt des Entlastungsrohrs abzubilden. Ein Einstau der Mulde tritt erst auf, wenn die Rigole vollständig gefüllt ist. Wie bei der Versickerungsmulde wird die Evapotranspiration vernachlässigt.

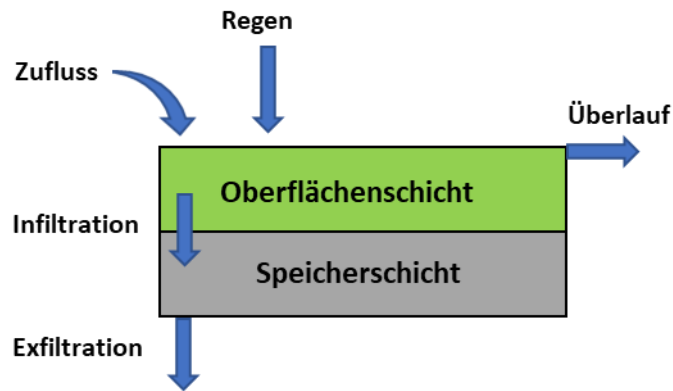


Abbildung 3-11: Aufbau des SUDS-Elements *infiltration trench* zur Abbildung des Mulden-Rigolen-Elements

Vordimensionierung

Die Vordimensionierung des Mulden-Rigolen-Elements wird analog zur Mulde und Rigole durchgeführt. Die gewählten Bemessungsgrößen sowie die ermittelten Abmessungen der Rigole und die Muldenfläche sind Tabelle 3-20 dargestellt. Die Grundflächen verschiedener Schichten eines SUDS-Elements müssen gleich groß sein, weshalb die Grundfläche der Rigole gleich der Muldengrundfläche gewählt wird. Die Form der Mulde wird als quadratisch festgelegt und für die Länge und Breite der Rigole die Wurzel der Muldenfläche angesetzt.

Tabelle 3-20: Vordimensionierung des Mulden-Rigolen-Elements gemäß DWA-A 138-1 (DWA, 2020)

| AC | k_i | f_z | L_R | b_R | h_R | s_R | $A_{S,m} [m^2]$ bei |
|---------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| $[m^2]$ | $[m/s]$ | $[-]$ | m | m | m | $[-]$ | T = 5 a |
| 1000 | $3,75 \cdot 10^{-5}$ | 1 | 5,95 | 5,95 | 0,33 | 0,9 | 35,4 |

Anpassung der Anlagengröße

In Tabelle 3-21 sind die Simulationsergebnisse des auf T = 5 a dimensionierten MRE bei einer Blockregenbelastung von T = 5 a, D = 90 min und einer Simulationsdauer von 105 min dargestellt. Dabei tritt erstmals ein Muldenüberlauf aus dem MRE auf. Das Bemessungsziel wird nicht erreicht, da bereits bei der Bemessungsjährlichkeit ein Muldenüberlauf auftritt.

Tabelle 3-21: Simulationsergebnisse des Mulden-Rigolen-Elements bei einer Blockregenbelastung von $T = 5$ a, $D = 90$ min

| Zufluss | Versickerung | Überlauf | Anfangsspeicher | Endspeicher | Vol. Fehler |
|---------|--------------|----------|-----------------|-------------|-------------|
| [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [%] |
| 805,72 | 209,49 | 15,29 | 0 | 552,91 | - 3,48 |

Zur Anpassung des MRE wird bei der Vordimensionierung der k_i -Wert zu $3,25 \cdot 10^{-5}$ m/s gewählt, was zur Vergrößerung des MRE führt. In Tabelle 3-22 sind die Simulationsergebnisse bei einer Blockregenbelastung von $T = 6$ a, $D = 60$ min und einer Simulationsdauer von 75 min gegeben, bei der erstmalig ein Muldenüberlauf aus dem MRE stattfindet.

Tabelle 3-22: Simulationsergebnisse des Mulden-Rigolen-Elements bei einer Blockregenbelastung von $T = 6$ a, $D = 60$ min

| Zufluss | Versickerung | Überlauf | Anfangsspeicher | Endspeicher | Vol. Fehler |
|---------|--------------|----------|-----------------|-------------|-------------|
| [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [%] |
| 727,64 | 149,82 | 0,39 | 0 | 551,25 | - 3,6 |

Festgelegte Modellparameter

Für die Vordimensionierung des MRE wird der Durchlässigkeitsbeiwert auf $k_i = 3,25 \cdot 10^{-5}$ m/s gesetzt. Tabelle 3-23 enthält die festgelegten Modellparameter, Dimensionen und Einstellungen für das auf $T = 5$ a dimensionierte MRE, während in Tabelle 3-24 die entsprechenden Werte für das auf $T = 100$ a dimensionierte MRE dargestellt sind.

Tabelle 3-23: Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung des auf T = 5 a bemessenen Mulden-Rigolen-Elements

| Modellparameter | | | Dimensionen und Einstellungen | | |
|---------------------------------|-------|--------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------|
| Bezeichnung | Wert | Einheit | Bezeichnung | Wert | Einheit |
| <i>Berm height</i> | 300 | mm | Anlagenfläche | 39,5 | m ² |
| <i>Vegetation vol. fraction</i> | 0,1 | | ki-Wert | 3,25·10 ⁻⁵ | m/s |
| <i>Surface roughness</i> | 0,2 | s/m ^{1/3} | AC | 1000 | m ² |
| <i>Surface slope</i> | 0,02 | m/m | fz | 1,1 | |
| <i>Storage thickness</i> | 331 | mm | L _R | 6,285 | m |
| <i>Storage void ratio</i> | 9 | | b _R | 6,285 | m |
| <i>Seepage rate</i> | 120,4 | mm/h | h _R | 0,331 | m |
| <i>Storage clogging factor</i> | 0 | | s _R | 0,9 | |
| <i>Coefficient for flow</i> | 0 | mm/h | Anfangsfüllung der Rigole | 0 | % |
| <i>Flow exponent</i> | 0 | | | | |
| <i>Offset height</i> | 0 | mm | | | |

Tabelle 3-24: Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung des auf T = 100 a bemessenen Mulden-Rigolen-Elements

| Modellparameter | | | Dimensionen und Einstellungen | | |
|---------------------------------|-------|--------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------|
| Bezeichnung | Wert | Einheit | Bezeichnung | Wert | Einheit |
| <i>Berm height</i> | 300 | mm | Anlagenfläche | 83,3 | m ² |
| <i>Vegetation vol. fraction</i> | 0,1 | | ki-Wert | 3,25·10 ⁻⁵ | m/s |
| <i>Surface roughness</i> | 0,2 | s/m ^{1/3} | AC | 1000 | m ² |
| <i>Surface slope</i> | 0,02 | m/m | fz | 1,1 | |
| <i>Storage thickness</i> | 523 | mm | L _R | 9,125 | m |
| <i>Storage void ratio</i> | 9 | | b _R | 9,125 | m |
| <i>Seepage rate</i> | 120,4 | mm/h | h _R | 0,523 | m |
| <i>Storage clogging factor</i> | 0 | | s _R | 0,9 | |
| <i>Coefficient for flow</i> | 0 | mm/h | Anfangsfüllung der Rigole | 0 | % |
| <i>Flow exponent</i> | 0 | | | | |
| <i>Offset height</i> | 0 | mm | | | |

3.5.2 Gründächer

Die untersuchten Gründacharten sind intensiv und extensiv begrünte Dächer sowie Retentionsdächer. Zunächst wird der in Anlehnung an die Dachbegrünungsrichtlinien

(FLL 2018) gewählte Dachaufbau beschrieben, anschließend das SUDS-Element, mit dem die jeweilige Dachart modelliert wird. Anschließend werden die Modellparameter auf Basis von Literaturwerten festgelegt und Simulationen durchgeführt, um die Retentionswirkung der verschiedenen Gründacharten bei Starkregenereignissen zu vergleichen.

3.5.2.1 Extensives Gründach

Tabelle 3-25 zeigt den Aufbau des mehrschichtigen extensiven Gründachs, das im Modell mit dem SUDS-Element *green roof* abgebildet wird (siehe Abbildung 3-12). In der Oberflächenschicht wird die Vegetation berücksichtigt, in der Bodenschicht das Vegetationssubstrat sowie das darunter liegende Filtervlies. In der Dränageschicht wird der Abfluss aus dem Dränelement modelliert. Als Dachform wird ein Flachdach mit einer Mindestneigung von 2 % gewählt, um einen Wasseranstau in der Bodenschicht zu vermeiden (FLL 2018). Die Evapotranspiration wird nicht berücksichtigt.

Tabelle 3-25: Schichten des extensiven Gründaches

| Schicht | Dicke [mm] | Art / Beschreibung |
|-------------|------------|---|
| Vegetation | - | Sedum-Moos-Kraut- oder Sedum-Kraut-Gras- Begrünung |
| Boden | 100 | Vegetationssubstrat für mehrschichtige extensiv Begrünung |
| Filtervlies | 10 | Vlies zum Schutz vor Verschlammung der Dränageschicht |
| Dränage | 25 | Dränelement aus Hartkunststoff |
| Schutzvlies | 15 | Vlies zum Schutz der Dachabdichtung |

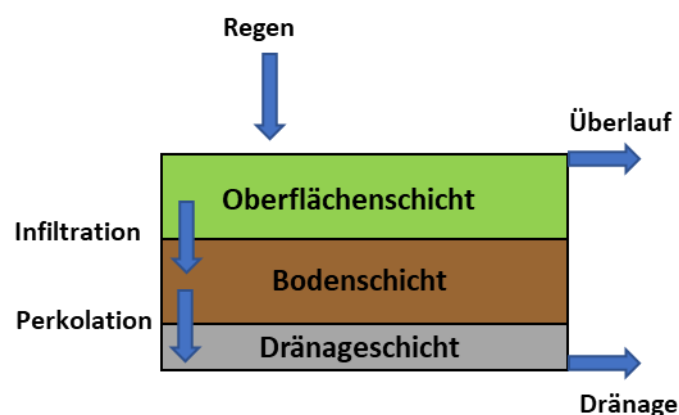


Abbildung 3-12: Aufbau des SUDS-Elements *green roof* zur Abbildung des intensiven und extensiven Gründaches

3.5.2.2 Intensives Gründach

Tabelle 3-26 zeigt den Aufbau des mehrschichtigen intensiven Gründachs, das wie das extensive Gründach mit dem SUDS-Element *green roof* modelliert wird (siehe Abbildung 3-12). Im Vergleich zum extensiven Gründach unterscheiden sich lediglich die Dicke der Bodenschicht und die Art der Vegetation. Wie auch beim extensiven Gründach wird als Dachform ein Flachdach mit einer Mindestneigung von 2 % gewählt, um einen Wasseranstau in der Bodenschicht zu vermeiden (FLL 2018). Die Evapotranspiration wird nicht berücksichtigt.

Tabelle 3-26: Schichten des intensiven Gründaches

| Schicht | Dicke [mm] | Art / Beschreibung |
|-------------|------------|--|
| Vegetation | - | Gras-Kraut-Begrünung oder Rasen bis hin zu Stauden/Gehölz |
| Boden | 300 | Vegetationssubstrat für mehrschichtige intensive Begrünung |
| Filtervlies | 10 | Vlies zum Schutz vor Verschlammung der Dränageschicht |
| Dränage | 25 | Dränelement aus Hartkunststoff |
| Schutzvlies | 15 | Vlies zum Schutz der Dachabdichtung |

3.5.2.3 Retentionsdach

Im Modell wird das Retentionsdach (Tabelle 3-27) mit dem SUDS-Element *bio-retention cell* abgebildet (Abbildung 3-13). Im Gegensatz zum *green roof* wird bei der *bio-retention cell* der Drainageabfluss als Drosseldurchfluss modelliert. Der Vorteil dieser Modellierung besteht darin, dass die Speicherschicht bis zu einer definierten Höhe eingestaut wird und erst danach ein Drainageabfluss erfolgt. Die Gesamtdicke des Dachaufbaus beträgt wie beim intensiven Gründach 350 mm, allerdings ist die Bodenschicht nur 150 mm dick. Unter der Bodenschicht befindet sich eine 125 mm hohe Retentionsschicht, die 100 mm eingestaut werden kann. Wird die Einstauhöhe von 100 mm erreicht, kommt es zu einem Überlauf aus der Retentionsschicht. Zusätzlich zum Überlauf wird am Boden der Retentionsschicht ein permanenter, gedrosselter Abfluss von 0,5 mm/h vorgesehen, über den das Retentionsdach nach einem Starkregenereignis langsam entleert wird.

Tabelle 3-27: Schichten des Retentionsdaches

| Schicht | Dicke [mm] | Art / Beschreibung |
|-------------|------------|--|
| Vegetation | - | Sedum-Kraut-Gras-Begrünung oder Gras-Kraut-Begrünung |
| Boden | 150 | Vegetationssubstrat für mehrschichtige intensive Begrünung |
| Filtervlies | 10 | Vlies zum Schutz vor Verschlammung der Retentionsschicht |
| Retention | 125 | Retentionsschicht aus Kunststoffelementen |
| Schutzvlies | 15 | Vlies zum Schutz der Dachabdichtung |

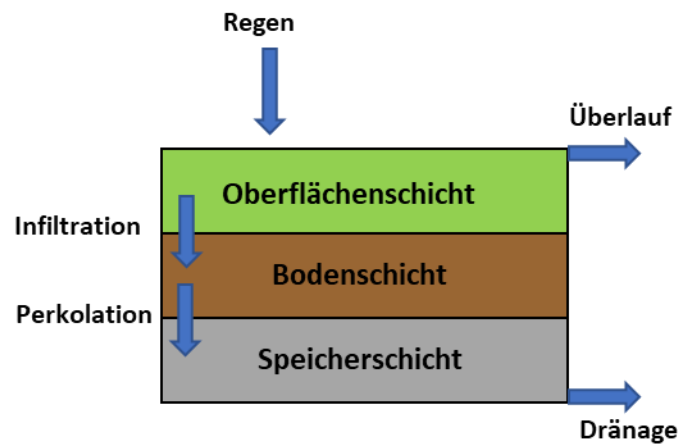


Abbildung 3-13: Aufbau des SUDS-Elements *bio-retention cell* zur Abbildung des Retentionsdaches

3.5.2.4 Auswahl der Modellparameter

Die Modellparameter zur Abbildung der verschiedenen Dachaufbauten werden auf Basis von Literaturwerten festgelegt. Dabei werden Publikationen herangezogen, in denen die Modellparameter des SUDS-Elements green roof mit Messdaten von Gründachversuchsaufbauten validiert beziehungsweise kalibriert werden. In Tabelle 3-28 sind die in den Publikationen verwendeten Modellparameter zusammengestellt.

Peng und Stovin (2017) untersuchen ein 3 m x 1 m großes Gründach mit einer 80 mm dicken Substratschicht aus Schüttgut mit Feinanteil, die mit Sedumarten bewachsen ist. Als Dränage wird ein 25 mm hohes Dränelement aus Kunststoff verbaut, über dem ein Filtervlies liegt, das die Dränage- von der Substratschicht trennt. Die Neigung des Versuchsaufbaus beträgt 2,6 %. Für die Kalibrierung der Modellparameter wurden zwei Regenereignisse herangezogen ($D = 42 \text{ h}$ und 23 h , $h_N = 100 \text{ mm}$ und 58 mm). Neben der Kalibrierung der Modellparameter führten Peng und Stovin (2017) eine Sensitivitätsanalyse durch. Sie kommen zu dem Schluss, dass die Evapotranspiration der empfindlichste Parameter bei Langzeitsimulationen ist. Bei intensiven Niederschlagsereignissen ist die Evapotranspiration zu vernachlässigen: Hier sind die sensitivsten Parameter das hydraulische Gefälle, die Feldkapazität und die hydraulische Leitfähigkeit. In Bezug auf die korrekte Abbildung der Abflussspitze sind die Modellparameter der Dränageschicht entscheidend.

Jeffers et al. (2022) untersuchen ein 7,43 m² großes Retentionsdach mit einer 60 mm dicken Substratschicht, auf der eine 20 mm dicke Vegetationsmatte (Sedum-Bewuchs) aufgebracht wird. Zum Schutz der Dränageschicht wird ein Filtervlies aus Mineralwolle eingesetzt. In der Dränageschicht ist ein 5 cm hoher Retentionsraum vorgesehen. Die Neigung des Versuchsaufbaus beträgt 2 %. Der Fokus der Publikation liegt auf dem Vergleich der SUDS-Elemente *rain garden* und *bio-retention cell* zur Abbildung eines Retentionsdaches. Jeffers et al. (2022) kommen zu dem Schluss, dass das Element

bio-retention cell besser geeignet ist, wenn der Wasserstand in der Dränageschicht größer als die Höhe der Dränageschicht ist. Dies tritt bei intensiven Starkregenereignissen auf, wenn sich die Retentionsschicht einstaut.

Iffland et al. (2021) untersuchen ein 2 m x 2 m großes Gründach mit einer 25 mm dicken Vegetationsmatte (*Sedum* Bewuchs) auf einer 60 mm dicken Substratschicht aus Lavasteinen mit Dolomit- und Organikanteil. Die 15 mm dicke Dränageschicht besteht aus einem Netz und ist durch ein Filtervlies von der darüber liegenden Substratschicht getrennt. Die Neigung des Versuchsaufbaus beträgt 2 %. Der Fokus der Publikation liegt auf der korrekten Abbildung der Evapotranspiration und weniger auf der Modellkalibrierung für Starkregenereignisse. Dennoch sind die kalibrierten Modellparameter von Bedeutung, weil sie zum Vergleich herangezogen werden können, da der Dachaufbau ähnlich dem des hier gewählten extensiven Gründachs ist.

Tabelle 3-28: Zusammenstellung der in den Publikationen verwendeten Modellparametern

| Schicht | Bezeichnung | Peng und Stovin (2017) | Jeffers et al. (2022) | Iffland et al. (2021) | Einheit |
|------------|---------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| Oberfläche | <i>Berm height</i> | 0 | 5 | 0,01 | mm |
| | <i>Vegetation vol. fraction</i> | 0 | 0,1 | 0,17 | |
| | <i>Surface roughness</i> | 0,15 | 0,2 | 0,18 | s/m ^{1/3} |
| | <i>Surface slope</i> | 0,026 | 2 | 0,02 | m/m |
| Boden | <i>Soil thickness</i> | 80 | 81 | 85 | mm |
| | <i>Soil porosity</i> | 0,45 | 0,69 | 0,58 | |
| | <i>Field capacity</i> | 0,3 | 0,35 | 0,34 | |
| | <i>Wilting point</i> | 0,05 | 0,05 | 0,08 | |
| | <i>Conductivity</i> | 881 | 1000 | 144,17 | mm/h |
| | <i>Conductivity slope</i> | 50 | 55 | 48,09 | |
| | <i>Suction head</i> | 110 | 51 | 45,19 | mm |
| Dränage | <i>Mat thickness</i> | 25 | 51 | 15 | mm |
| | <i>Mat void fraction</i> | 0,6 | 0,98 | 0,44 | |
| | <i>Mat roughness</i> | 0,03 | 0,4 | 0,21 | s/m ^{1/3} |
| Speicher | <i>Storage thickness</i> | - | 51 | - | mm |
| | <i>Storage void ratio</i> | - | 0,98 | - | |
| | <i>Seepage rate</i> | - | 0 | - | mm/h |
| | <i>Storage clogging factor</i> | - | 0 | - | |
| | <i>Coefficient for flow</i> | - | 8,4 | - | mm/h |
| | <i>Flow exponent</i> | - | 0,5 | - | |
| | <i>Offset height</i> | - | 0 | - | mm |

In Tabelle 3-29 sind die festgelegten Modellparameter zur Abbildung der verschiedenen Gründächer aufgeführt. Die Einstauhöhe (*berm height*) definiert, dass ab 1 cm Wasserstand auf der Oberfläche ein Überlauf stattfindet. Die Werte für das Vegetationsvolumen (*vegetation volume fraction*) und die Oberflächenrauheit (*surface roughness*) werden für das extensive Gründach und Retentionsdach von Jeffers et al. (2022) übernommen, beim intensiven Gründach sind sie aufgrund der dichteren Vegetation höher angesetzt. Die Dachneigung (*surface slope*) ist bei den drei Dachaufbauten identisch und beträgt 2 %. Die Werte zur Modellierung der Bodenschicht basieren auf Peng und Stovin (2017), lediglich die Dicke variiert zwischen den Dacharten. Im Vergleich zu den Bodenparametern aus Jeffers et al. (2022) und Iffland et al. (2021) liegen sie in einer ähnlichen Größenordnung. Lediglich die hydraulische Leitfähigkeit (*conductivity*) ist bei Iffland et al. (2021) deutlich geringer, da die Modellparameter dort auf die korrekte Abbildung der Evapotranspiration kalibriert wurden und nicht auf das Abflussverhalten bei Starkregen. Die Parameter der Dränageschicht sind beim extensiven und intensiven Gründach identisch und wurden ebenfalls aus Peng und Stovin (2017) übernommen. Die Höhe der Dränageschicht (*mat thickness*) leitet sich von dem eingesetzten Dränelement ab. Beim Retentionsdach werden die Parameter zur Abbildung der Retentionsschicht direkt aus dem Aufbau abgeleitet. Der Abfluss aus der Retentionsschicht (*coefficient for flow*) wurde mit 200 mm/h bewusst hoch angesetzt, um eine Abflussbegrenzung zu vermeiden.

Tabelle 3-29: Festgelegte Modellparameter zur Abbildung der Gründächer

| Schicht | Bezeichnung | Extensives Gründach | Intensives Gründach | Retentionsdach | Einheit |
|------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| Oberfläche | <i>Berm height</i> | 10 | 10 | 10 | mm |
| | <i>Vegetation vol. fraction</i> | 0,1 | 0,2 | 0,1 | |
| | <i>Surface roughness</i> | 0,2 | 0,5 | 0,2 | s/m ^{1/3} |
| | <i>Surface slope</i> | 0,02 | 0,02 | 0,02 | m/m |
| Boden | <i>Soil thickness</i> | 110 | 310 | 160 | mm |
| | <i>Soil porosity</i> | 0,45 | 0,45 | 0,45 | |
| | <i>Field capacity</i> | 0,3 | 0,3 | 0,3 | |
| | <i>Wilting point</i> | 0,05 | 0,05 | 0,05 | |
| | <i>Conductivity</i> | 881 | 881 | 881 | mm/h |
| | <i>Conductivity slope</i> | 50 | 50 | 50 | |
| | <i>Suction head</i> | 110 | 110 | 110 | mm |
| Dränage | <i>Mat thickness</i> | 25 | 25 | - | mm |
| | <i>Mat void fraction</i> | 0,6 | 0,6 | - | |
| | <i>Mat roughness</i> | 0,03 | 0,03 | - | s/m ^{1/3} |
| Speicher | <i>Storage thickness</i> | - | - | 125 | mm |
| | <i>Storage void ratio</i> | - | - | 9 | |
| | <i>Seepage rate</i> | - | - | 0,5 | mm/h |
| | <i>Storage clogging factor</i> | - | - | 0 | |
| | <i>Coefficient for flow</i> | - | - | 200 | mm/h |
| | <i>Flow exponent</i> | - | - | 0 | |
| | <i>Offset height</i> | - | - | 100 | mm |

3.5.2.5 Vergleich des Abflussverhaltens

Da die Gründächer im Gegensatz zu den anderen RWBA nicht auf Auftretenswahrscheinlichkeiten von Starkregen bemessen werden, wird ihr Abflussverhalten bei verschiedenen Niederschlagsbelastungen (Tabelle 3-30) verglichen. Im Modell sind die Dachflächen jeweils 1000 m² groß und zu 100 % als Grün- oder Retentionsdach ausgeführt. Der Dränageabfluss und der Überlauf sind an denselben Schacht angeschlossen.

Die Simulationsergebnisse sind in Tabelle 3-31 zusammengestellt. Beim 5 jährlichen Regen (R0B) tritt bei keinem der Gründächer ein Dränageabfluss auf. Ab dem 100 jährlichen Regen (R1B) tritt beim extensiven Gründach ein Dränageabfluss von 14,36 mm auf, in Bezug auf die Niederschlagshöhe von $h_N = 48,9$ mm werden somit 33,54 mm Niederschlag im extensiven Gründachaufbau zurückgehalten. Infolge R2B mit

$h_N = 100$ mm kommt es beim extensiven Gründach und auch beim intensiven Gründach zu einem Drainageabfluss. Der Drainageabfluss beim extensiven Gründach ist sehr hoch und beträgt 65,30 mm, somit werden 33,7 mm im extensiven Gründachaufbau gespeichert. Es lässt sich feststellen, dass das hier untersuchte extensive Gründach eine Niederschlagshöhe von ca. 34 mm zurückhalten kann. Der Drainageabfluss beim intensiven Gründach ist vergleichsweise gering und beträgt nur 2,78 mm. Durch die dickere Bodenschicht des intensiven Gründachs (30 cm) im Vergleich zur Bodenschicht des extensiven Gründachs (10 cm) kann eine deutlich größere Niederschlagsmenge zurückgehalten werden.

Infolge R3B mit $h_N = 200$ mm kommt es beim Retentionsdach zu einem Drainageabfluss von 59,37 mm, es werden also 140,63 mm im Dachaufbau zurückgehalten. Das Retentionsdach kann im Vergleich zum intensiven Gründach (Drainageabfluss 97,25 mm, Rückhalt 102,75 mm) eine größere Niederschlagsmenge zurückhalten, obwohl der Dachaufbau mit 30 cm noch geringer ist als beim intensiven Gründach mit 35 cm. Der Grund dafür ist die Retentionsschicht, deren Volumen – im Gegensatz zum Bodensubstrat – nahezu vollständig mit Wasser gefüllt werden kann.

Tabelle 3-30: Eigenschaften der Regen

| Bezeichnung | Verteilung | Jährlichkeit [a] | Dauer [min] | Niederschlagshöhe [mm] | SRI [-] |
|-------------|------------|---------------------|----------------|---------------------------|------------|
| R0B | Blockregen | 5 | 60 | 25 | 2 |
| R1B | Blockregen | 100 | 60 | 48,9 | 7 |
| R2B | Blockregen | >> 100 | 60 | 100 | 10 |
| R3B | Blockregen | >> 100 | 60 | 200 | 12 |

Tabelle 3-31: Vergleich des Abflussverhalten der verschiedenen Gründächer

| Regen | Dach | Zufluss | Infiltration | Überlauf | Drainage | Anfangsspeicher | Endspeicher | Vol. Fehler |
|-------|------|---------|--------------|----------|----------|-----------------|-------------|-------------|
| [-] | [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [%] |
| R0B | Ext. | 25 | 0 | 0 | 0 | 5,5 | 30,5 | 0 |
| | Int. | 25 | 0 | 0 | 0 | 15,5 | 40,5 | 0 |
| | Ret. | 25 | 0 | 0 | 0 | 8 | 33 | 0 |
| R1B | Ext. | 48,9 | 0 | 0 | 14,36 | 5,5 | 40,21 | - 0,32 |
| | Int. | 48,9 | 0 | 0 | 0 | 15,5 | 64,4 | 0 |
| | Ret. | 48,9 | 0,21 | 0 | 0 | 8 | 56,7 | - 0,01 |
| R2B | Ext. | 100 | 0 | 0 | 65,30 | 5,5 | 40,39 | - 0,18 |
| | Int. | 100 | 0 | 0 | 2,78 | 15,5 | 112,9 | - 0,16 |
| | Ret. | 100 | 0,42 | 0 | 0 | 8 | 107,59 | - 0,01 |
| R3B | Ext. | 200 | 0 | 0 | 165,32 | 5,5 | 40,36 | - 0,09 |
| | Int. | 200 | 0 | 0 | 97,25 | 15,5 | 118,7 | - 0,21 |
| | Ret. | 200 | 0,52 | 0 | 59,37 | 8 | 148,32 | - 0,1 |

3.5.3 Zisternentypen

Die Zisternentypen umfassen Zisternen sowie ungedrosselte und gedrosselte Retentionszisternen. Zunächst wird das SUDS-Element vorgestellt, mit dem die jeweilige Zisterne abgebildet wird, anschließend werden die Dimensionierung und die Auswahl der Modellparameter beschrieben.

3.5.3.1 Zisterne

Im Modell wird die Zisterne mit dem SUDS-Element *rain barrel* abgebildet, dessen Aufbau in Abbildung 3-14 dargestellt ist. Ein Drosselabfluss ist nicht vorgesehen. Sobald der Wasserstand in der Zisterne die Zisternenhöhe überschreitet, kommt es zu einem Überlauf. Eine Wasserentnahme ist im Modell nicht berücksichtigt.

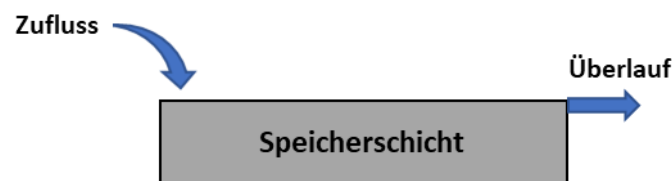


Abbildung 3-14: Aufbau des SUDS-Elements *rain barrel* zur Abbildung der Zisterne und ungedrosselten Retentionszisterne

Dimensionierung

Die Bemessung der Zisterne erfolgt nach dem vereinfachten Ansatz mit jährlichem Zeitschritt gemäß DIN EN 16941-1 (DIN EN 2024). Zur Sicherstellung einer allgemein anwendbaren Bemessung wird die erforderliche Speicherkapazität auf Basis des jährlichen Regenwasserertrags und nicht des individuellen Wasserbedarfs ermittelt. Die Formeln zur Bemessung sind in Anhang A5 aufgeführt. In Tabelle 3-32 sind die Bemessungsparameter und das berechnete Volumen der Zisterne aufgelistet. Der Regenwasserertrag wird für eine 1000 m² Dachfläche mit einem Oberflächenertragswert von 0,8 (geneigte raue Dachoberfläche, siehe Tabelle 2 DIN EN 16941-1 (DIN EN 2024)) berechnet. Das berechnete Zisternenvolumen von 23,7 m³ pro 1000 m² Dachfläche liegt im Bereich typischer Werte aus Literatur und Praxis (Webber et al. 2020, Burns et al. 2012, Hamel und Fletcher 2014, Schubert et al. 2017).

Tabelle 3-32: Bemessungsparameter und Volumen der Zisterne

| Auffangfläche | Oberflächenertragsbeiwert | Jahresniederschlagshöhe |
|-------------------|---------------------------|-------------------------|
| [m ²] | [-] | [mm] |
| 1000 | 0,8 | 572 |

| Hydraulischer Wirkungsgrad | Regenwasserertrag | Trockenperiode | Volumen |
|----------------------------|-------------------|----------------|-------------------|
| [-] | [m ³] | [Tage] | [m ³] |
| 0,9 | 411,84 | 21 | 23,7 |

Festgelegte Modellparameter

In Tabelle 3-33 sind die festgelegten Modellparameter sowie die Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der Zisterne aufgelistet. Es wird lediglich die Höhe der Zisterne (*barrel height*) definiert. Da weder eine Entnahme aus der Zisterne noch ein Drosselabfluss berücksichtigt werden, bleiben die anderen Parameter unberücksichtigt. Vor dem Regenereignis wird ein Füllstand von 50 % angenommen.

Tabelle 3-33: Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der Zisterne

| Modellparameter | | | Dimensionen und Einstellungen | | |
|-----------------------------|------|---------|-------------------------------|-------|----------------|
| Bezeichnung | Wert | Einheit | Bezeichnung | Wert | Einheit |
| <i>Barrel height</i> | 2000 | mm | Anlagenfläche | 11,85 | m ² |
| <i>Coefficient for flow</i> | 0 | mm/h | Anfangsfüllung der Zisterne | 50 | % |
| <i>Flow exponent</i> | 0 | | | | |
| <i>Offset height</i> | 0 | mm | | | |
| <i>Delay</i> | 0 | h | | | |

In Tabelle 3-34 sind die Simulationsergebnisse infolge R1B dargestellt. Etwa die Hälfte des Niederschlagsvolumens kann von der Zisterne aufgenommen werden, der Rest läuft über.

Tabelle 3-34: Simulationsergebnisse bei R1B (T = 100 a, D = 60 min)

| Zufluss [mm] | Versickerung [mm] | Überlauf [mm] | Anfangsspeicher [mm] | Endspeicher [mm] | Vol. Fehler [%] |
|-----------------|----------------------|------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| 2096,47 | 0 | 1096,47 | 1000 | 2000 | 0 |

3.5.3.2 Retentionszisterne

Die Retentionszisterne wird in zwei Varianten ausgeführt: Mit und ohne Drosselabfluss. Für die Variante ohne Drosselabfluss wird wie bei der Zisterne das SUDS-Element *rain barrel* ohne Berücksichtigung eines Drosselabflusses verwendet (Abbildung 3-14). Bei der gedrosselten Retentionszisterne wird ein Drosselabfluss aus der Speicherschicht berücksichtigt (Abbildung 3-15).

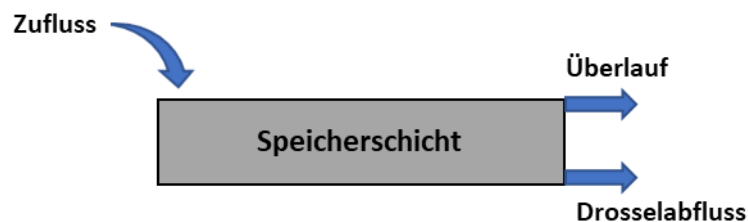


Abbildung 3-15: Aufbau des SUDS-Elements *rain barrel* zur Abbildung der gedrosselten Retentionszisterne

Dimensionierung

Das Nutzvolumen der Retentionszisterne wird gemäß Tabelle 3-32 berechnet. Das Retentionsvolumen ergibt sich aus der Niederschlagshöhe des Starkregens, der zurückgehalten werden soll. Die Bemessungsgleichungen sind in Anhang A6 gegeben. Ziel der Bemessung ist der vollständige Rückhalt des 5 jährlichen Starkregens (D = 60 min, $h_N = 25$ mm) ohne Berücksichtigung eines Drosselabflusses, auch bei Vollfüllung des Nutzvolumens. Bei einer angeschlossenen abflusswirksamen Dachfläche von 1000 m^2 und der Niederschlagshöhe $h_N = 25$ mm ergibt sich ein erforderliches Retentionsvolumen von 25 m^3 . Addiert man das Nutzvolumen von $23,7 \text{ m}^3$ hinzu, ergibt sich ein Gesamtvolumen der Retentionszisterne von $48,7 \text{ m}^3$.

Festgelegte Modellparameter

Die Modellparameter der ungedrosselten Retentionszisterne entsprechen denen der Zisterne (siehe Tabelle 3-33). Das größere Volumen der Retentionszisterne wird über die größere Grundfläche von $24,35 \text{ m}^2$ abgebildet. Der Anfangsfüllstand der gesamten

Zisterne liegt bei 24,33 % und somit einer Wassermenge von 11,85 m³. Dies entspricht der gleichen Wassermenge wie bei der Zisterne mit einem Füllstand von 50 %.

Tabelle 3-35 zeigt die festgelegten Modellparameter sowie die Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der gedrosselten Retentionszisterne. Wie bei der Zisterne beträgt die Höhe (*barrel height*) 2000 mm. Der Drosselabfluss setzt ein, sobald das Nutzvolumen vollständig gefüllt ist (die 973,31 mm *offset height* entsprechen dem Nutzvolumen von 23,7 m³). Der Drosselabfluss wird mit 100 l/s pro ha angeschlossener abflusswirksamer Dachfläche festgelegt (*coefficient for flow*) und ist durch Herstellerangaben motiviert (Angaben und Erläuterung in Anhang A10). Bei einer angeschlossenen Dachfläche von 1000 m² beträgt der Drosselabfluss entsprechend 10 l/s.

Tabelle 3-35: Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der gedrosselten Retentionszisterne

| Modellparameter | | | Dimensionen und Einstellungen | | |
|-----------------------------|--------|---------|-------------------------------|-------|----------------|
| Bezeichnung | Wert | Einheit | Bezeichnung | Wert | Einheit |
| <i>Barrel height</i> | 2000 | mm | Anlagenfläche | 24,35 | m ² |
| <i>Coefficient for flow</i> | 1478,5 | mm/h | Anfangsfüllung der Zisterne | 24,33 | % |
| <i>Flow exponent</i> | 0 | | | | |
| <i>Offset height</i> | 973,31 | mm | | | |
| <i>Delay</i> | 0 | h | | | |

In Tabelle 3-36 sind die Simulationsergebnisse beider Varianten der Retentionszisternen (RZ) für die Niederschlagsbelastungen R1B und R2B aufgelistet. Abbildung 3-16 zeigt die zugehörigen zeitlichen Verläufe der Gesamtabflüsse. Infolge R1B ist der Gesamtabfluss aus der gedrosselten RZ deutlich größer als bei der ungedrosselten Variante. Infolge R2B tritt bei der gedrosselten RZ der maximale Gesamtabfluss kürzer auf als bei der ungedrosselten Variante, weil durch den Drosselabfluss schon ein Teil des Zuflusses vorab abgeleitet wird.

Tabelle 3-36: Simulationsergebnisse Retentionszisternen

| Regen | RZ | Zufluss | Überlauf | Drossel | Anfangs- speicher | End- speicher | Vol. Fehler |
|-------|---------|---------|----------|---------|----------------------|------------------|----------------|
| [-] | [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [%] |
| R1B | ungedr. | 2001,85 | 488,45 | 0 | 486,6 | 2000 | 0 |
| | gedr. | 2001,85 | 0 | 1427,14 | 486,6 | 1085,95 | - 0,99 |
| R2B | ungedr. | 4100,41 | 2587,01 | 0 | 486,6 | 2000 | 0 |
| | gedr. | 4100,41 | 1270,13 | 1623,43 | 486,6 | 1718,1 | - 0,54 |

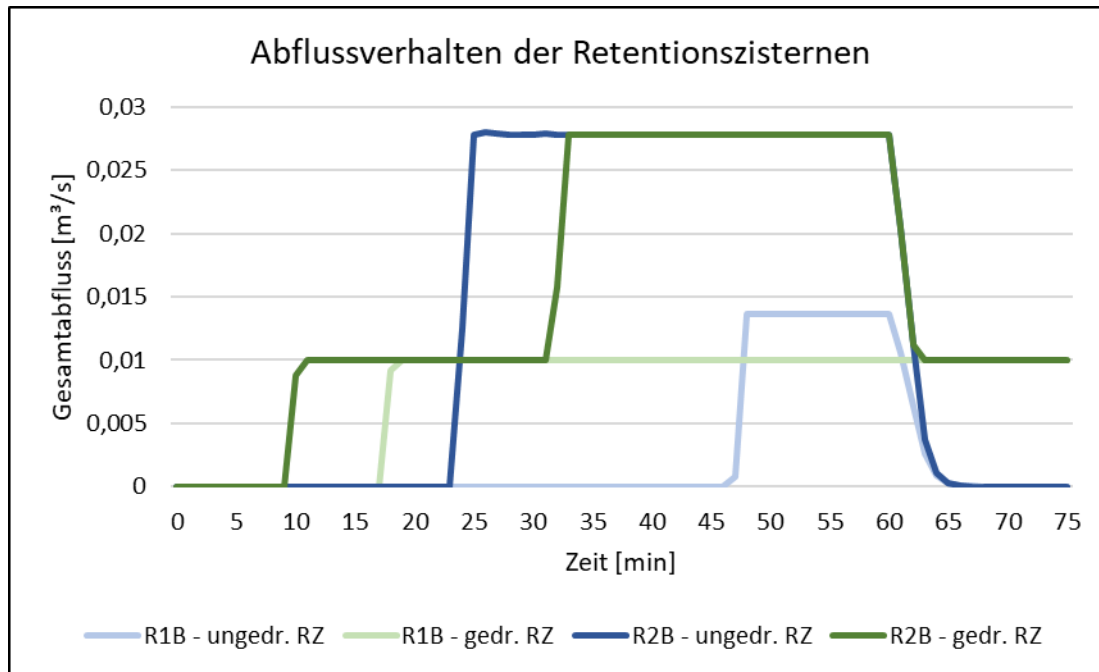


Abbildung 3-16: Gesamtabfluss (Überlauf- und Drosselablauf) aus der ungedrosselten und gedrosselten Retentionszisterne infolge R1B und R2B

3.5.4 Modifizierte Straßenbäume

Die modifizierten Straßenbäume umfassen den hydrologisch optimierten Baumstandort und die Baumrigole. Zunächst wird der Aufbau und das SUDS-Element dargestellt, dann die Auswahl der Modellparameter und die Dimensionierung beschrieben.

3.5.4.1 Hydrologisch optimierter Baumstandort

Tabelle 3-37 zeigt den Aufbau des hydrologisch optimierten Baumstandorts (HOB), der im Modell mit dem SUDS-Element *rain garden* abgebildet wird (siehe Abbildung 3-17). Der Aufbau des hydrologisch optimierten Baumstandorts ist angelegt an den Empfehlungen und Praxiserfahrungen zu vitalen Baumstandorten aus dem Projekt BlueGreenStreets (BlueGreenStreets 2022). Im Projekt BlueGreenStreets wird zwischen hydrologisch optimierten Baumstandorten im Bestand und Neubau unterschieden, der hier gewählte Aufbau entspricht im Wesentlichen dem hydrologisch optimierten Baumstandort im Bestand. In der Oberflächenschicht wird die eingemuldete Baumscheibe modelliert, in der Bodenschicht das Baumsubstrat und der existierende Boden. Die Wasserentnahme und die Evapotranspiration durch den Baum werden vernachlässigt, da der Fokus in dieser Arbeit auf kurzen Starkregenereignissen liegt.

Tabelle 3-37: Aufbau des hydrologisch optimierten Baumstandorts (angelehnt an (BlueGreenStreets 2022))

| Schicht | Höhe [cm] | Beschreibung |
|---------------------|-----------|--|
| Baumscheibe | 5 | Einmuldung der Baumscheibe |
| Substrat | 40 | Baumsubstrat mit einem Porenvolumen von 35 % |
| Existierender Boden | 110 | Existierender Boden/Baumsubstrat bis 1,5 m Tiefe mit einem Porenvolumen von 20 % |

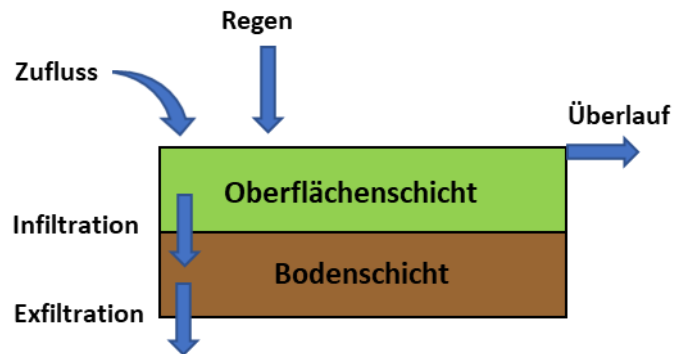


Abbildung 3-17: Aufbau des SUDS-Elements rain garden zur Abbildung des hydrologisch optimierten Baumstandortes

Auswahl der Modellparameter

In der FLL-Richtlinie „Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 2“ (FLL 2018) sind Anforderungen an Baumsubstrate zusammengestellt. Unter anderem werden Wertebereiche für die Wasserdurchlässigkeit k_f , die Wasserkapazität und die Luftkapazität gegeben. Die Wasserkapazität und Luftkapazität bilden zusammen das Porenvolumen. Für die Wasserdurchlässigkeit k_f des eingebauten und verdichteten Substrats wird ein Wertebereich von $k_f = 5 \cdot 10^{-4}$ bis $5 \cdot 10^{-6}$ angegeben, für die Modellierung wird $k_f = 5 \cdot 10^{-5}$ als hydraulische Leitfähigkeit gewählt. Die Wasserkapazität sollte mindestens 25 Vol.-% und die Luftkapazität mindestens 10 Vol.-% betragen, was zusammen ein Mindestporenvolumen von 35 % ergibt. Dieser Wert wird im Baumsubstrat eingehalten, das in BlueGreenStreets (2022) für den hydrologisch optimierten Baumstandort empfohlen wird (siehe Tabelle 3-37). Da im SUDS-Element *rain garden* nur eine Bodenschicht modelliert werden kann, werden das Baumsubstrat und der existierende Boden als eine Schicht mit einer Höhe von 1,5 m und einem Porenvolumen von 24 % dargestellt, wobei das Porenvolumen anteilig entsprechend der Schichtdicke berechnet wird:

$$\frac{40 \text{ cm} \cdot 35 \% + 110 \text{ cm} \cdot 20 \%}{150 \text{ cm}} = 24 \%$$

In Tabelle 3-38 sind die festgelegten Modellparameter sowie die Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung des hydrologisch optimierten Baumstandorts aufgelistet.

Tabelle 3-38: Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung des hydrologisch optimierten Baumstandorts

| Modellparameter | | | Dimensionen und Einstellungen | | |
|---------------------------------|-------|--------------------|-------------------------------|------|----------------|
| Bezeichnung | Wert | Einheit | Bezeichnung | Wert | Einheit |
| <i>Berm height</i> | 50 | mm | Anlagenfläche | 9 | m ² |
| <i>Vegetation vol. fraction</i> | 0,1 | | Anfangssättigung des Bodens | 50 | % |
| <i>Surface roughness</i> | 0,2 | s/m ^{1/3} | | | |
| <i>Surface slope</i> | 0,02 | m/m | | | |
| <i>Soil class</i> | | | | | |
| <i>Soil thickness</i> | 1500 | mm | | | |
| <i>Soil porosity</i> | 0,24 | | | | |
| <i>Field capacity</i> | 0,190 | | | | |
| <i>Wilting point</i> | 0,085 | | | | |
| <i>Conductivity</i> | 180 | mm/h | | | |
| <i>Conductivity slope</i> | 55,4 | | | | |
| <i>Suction head</i> | 110 | mm | | | |
| <i>Seepage rate</i> | 120,4 | mm/h | | | |

Dimensionierung

Bei den Versickerungsanlagen wird die Anlagengröße in Abhängigkeit der angeschlossenen befestigten Fläche festgelegt. Allerdings sind bei einem hydrologisch optimierten Baumstandort die Randbedingungen anders: Für die Entwicklung des Baums muss ein Mindestvolumen der Pflanzgrube vorgesehen werden. Die Größe der Anlage darf dieses Volumen nicht unterschreiten. Auch das maximale Volumen der Pflanzgrube ist begrenzt: Durch die Anordnung der Baumstandorte im Straßenraum ist nur wenig Platz vorhanden. Aufgrund dieser Randbedingungen wird für den hydrologisch optimierten Baumstandort im Modell eine Standardgröße festgelegt und untersucht, welche abflusswirksame maximal Fläche angeschlossen werden kann. Dadurch wird die Anlage beim Bemessungsregen vollständig ausgelastet.

Für die Bemessung des hydrologisch optimierten Baumstandorts wird ein Blockregen verwendet. Zu Beginn der Simulation ist der Boden zu 50 % wassergesättigt. Die Simulationsdauer beträgt 75 min. Tabelle 3-39 zeigt die Simulationsergebnisse bei einer Blockregenbelastung von $T = 6$ a, $D = 60$ min und angeschlossenen abflusswirksamen Fläche von 78 m² für den HOB, bei der erstmalig ein Überlauf stattfindet. Das 5 jährliche Niederschlagsereignis kann komplett zurückgehalten werden. Daher wird festgelegt, dass an den hydrologisch optimierten Baumstandort eine abflusswirksame Fläche von 78 m² angeschlossen werden kann.

Tabelle 3-39: Simulationsergebnisse bei einer Blockregenbelastung von $T = 6$ a, $D = 60$ min für den HOB, 78 m² abflusswirksame Fläche angeschlossen

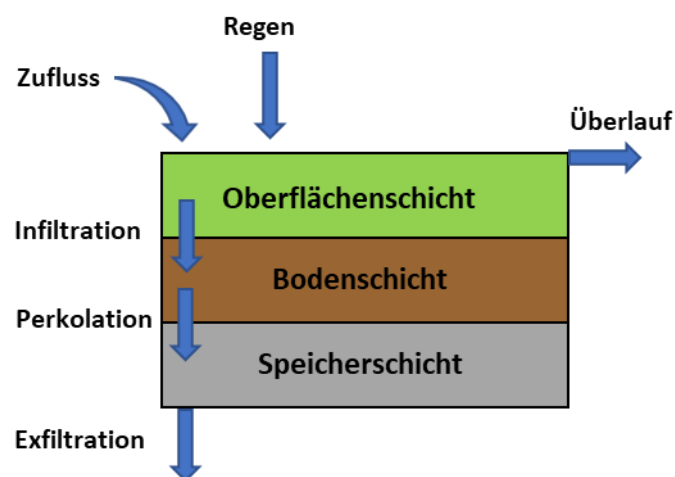
| Zufluss [mm] | Versickerung [mm] | Überlauf [mm] | Anfangsspeicher [mm] | Endspeicher [mm] | Vol. Fehler [%] |
|-----------------|----------------------|------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| 221,31 | 92,55 | 4,5 | 243,75 | 370,02 | - 0,43 |

3.5.4.2 Baumrigole

Tabelle 3-40 zeigt den Aufbau der Baumrigole, die im Modell mit dem SUDS-Element *bio-retention cell* abgebildet wird (siehe Abbildung 3-18). Die zusätzliche Speicherschicht der *bio-retention cell* ist notwendig, um die unter dem Baumsubstrat liegende Rigole mit Wannenspeicher abzubilden. Die Baumscheibe wird nicht überbaut, sondern als muldenförmige Grünfläche ausgeführt, die eingestaut werden kann. Wie beim HOB werden die Wasserentnahme und die Evapotranspiration durch den Baum vernachlässigt.

Tabelle 3-40: Aufbau der Baumrigole (Empfehlung aus BGS (2022))

| Schicht | Höhe [cm] | Beschreibung |
|----------------|-----------|---|
| Baumscheibe | 20 | Einmuldung der Baumscheibe, 20 cm Einstau möglich |
| Baumsubstrat | 150 | Optimiertes Baumsubstrat mit einem Porenvolumen von 25 % |
| Rigole | 30 | Rigole (Sand/Split/Kies) mit einem Porenvolumen von 30 % |
| Wannenspeicher | 30 | Wannenspeicher (Sand/Kies) mit einem Porenvolumen von 30 %, abgedichtet (nicht vollständig) durch z.B. Lehm |

Abbildung 3-18: Aufbau des SUDS-Elements *bio-retention cell* zur Abbildung der Baumrigole

Auswahl der Modellparameter

Die Bodenparameter werden wie beim hydrologisch optimierten Baumstandort nach den Empfehlungen der FLL-Richtlinie „Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 2“ (FLL 2010) gewählt. Abgewichen wird dabei bei der Auswahl des Mindestporenvolumen des optimierten Baumsubstrats (Empfehlung nach FLL- Richtlinie: 0,35 %), das gemäß der Praxisempfehlung aus dem Forschungsprojekt BlueGreenStreets (BlueGreenStreets 2022) mit 0,25 % angesetzt wird.

Die Rigole und der darunter liegende Wannenspeicher werden im Modell gemeinsam in der Speicherschicht abgebildet, wobei die *storage void ratio* (siehe Gleichung (3-1)) zu 0,427 gewählt wird, was einem Porenvolumen von 30 % entspricht. Der Wannenspeicher hat eine Höhe von 30 cm, weshalb die *offset height* des Speichers ebenfalls zu 30 cm festgelegt wird. Dadurch tritt ein Überlauf aus dem Wannenspeicher erst ab einem Wasserstand von 30 cm ein. Zudem wird in der Speicherschicht eine *seepage rate* von 12,04 mm/h angesetzt, um eine langsame Exfiltrationen aus dem Wannenspeicher zu ermöglichen und eine dauerhafte Vernässung des Wurzelbereichs vermieden wird. Tabelle 3-41 enthält die festgelegten Modellparameter sowie die Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung des hydrologisch optimierten Baumstandorts.

Storage void ratio:

$$storage\ void\ ratio = \frac{Porenvolumen}{(1 - Porenvolumen)} \quad (3-1)$$

Tabelle 3-41: Festgelegte Modellparameter sowie Dimensionen und Einstellungen zur Abbildung der Baumrigole

| Modellparameter | | | Dimensionen und Einstellungen | | |
|---------------------------------|-------|--------------------|-------------------------------|------|----------------|
| Bezeichnung | Wert | Einheit | Bezeichnung | Wert | Einheit |
| <i>Berm height</i> | 200 | mm | Anlagenfläche | 9 | m ² |
| <i>Vegetation vol. fraction</i> | 0,1 | | Anfangssättigung des Bodens | 50 | % |
| <i>Surface roughness</i> | 0,2 | s/m ^{1/3} | | | |
| <i>Surface slope</i> | 0,02 | m/m | | | |
| <i>Soil class</i> | | | | | |
| <i>Soil thickness</i> | 1500 | mm | | | |
| <i>Soil porosity</i> | 0,24 | | | | |
| <i>Field capacity</i> | 0,190 | | | | |
| <i>Wilting point</i> | 0,085 | | | | |
| <i>Conductivity</i> | 180 | mm/h | | | |
| <i>Conductivity slope</i> | 55,4 | | | | |
| <i>Suction head</i> | 110 | mm | | | |
| <i>Storage thickness</i> | 600 | mm | | | |
| <i>Storage void ratio</i> | 0,429 | | | | |
| <i>Seepage rate</i> | 120,4 | mm/h | | | |
| <i>Storage clogging factor</i> | 0 | | | | |
| <i>Coefficient for flow</i> | 26,68 | mm/h | | | |
| <i>Flow exponent</i> | 0 | | | | |
| <i>Offset height</i> | 0 | mm | | | |
| <i>Storage thickness</i> | 300 | mm | | | |

Dimensionierung

Tabelle 3-42 zeigt die Simulationsergebnisse bei einer Blockregenbelastung von $T = 6$ a, $D = 60$ min und angeschlossenen abflusswirksamen Fläche von 120 m^2 für die Baumrigole, bei der erstmalig ein Überlauf stattfindet. Das 5 jährliche Niederschlagsereignis kann komplett zurückgehalten werden. Es wird festgelegt, dass an die Baumrigole eine abflusswirksame Fläche von 120 m^2 angeschlossen werden kann.

Tabelle 3-42: Simulationsergebnisse bei einer Blockregenbelastung von $T = 6$ a, $D = 60$ min für die Baumrigole, 120 m² abflusswirksame Fläche angeschlossen

| Zufluss | Versickerung | Überlauf | Anfangsspeicher | Endspeicher | Vol. Fehler |
|---------|--------------|----------|-----------------|-------------|-------------|
| [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [%] |
| 340,21 | 15,05 | 29,87 | 333,81 | 629,24 | - 0,10 |

3.6 Modellintegration der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen

Die Integration der RWBA in das 1D/2D-Modell umfasst sowohl ihre Implementierung als auch ihre räumliche Anordnung. Die Implementierung beschreibt, wie die RWBA in den Modellelementen abgebildet werden und auf welche Weise sie mit dem 1D/2D-Modell verbunden sind. Die räumliche Anordnung legt fest, wie die RWBA im Modell verteilt sind.

3.6.1 Implementierung

Im Modell werden die Dachflächen an die RWBA angeschlossen, mit Ausnahme der modifizierten Straßenbäume. Die RWBA werden über das Objekt Einzugsgebiet (*sub-catchment*) in das Modell implementiert. Dabei kann die RWBA entweder das gesamte Einzugsgebiet (EZG) oder nur einen Teil davon einnehmen. In letzterem Fall wird die verbleibende Fläche des EZG an die RWBA angeschlossen und entwässert in diese. In Abbildung 3-19 sind zur Veranschaulichung verschiedene Implementierungsmöglichkeiten von Mulden, an die abflusswirksame Flächen angeschlossen sind, dargestellt. Die Mulden und die abflusswirksamen Flächen werden alle als Einzugsgebiete (EZG) modelliert:

- EZG1: 1000 m² Fläche, beinhaltet 1000 m² abflusswirksame Fläche, direkt ohne Mulde an Schacht angeschlossen (dient hier zum Vergleich)
- EZG2: 1000 m² Fläche, aufgeteilt in 911,6 m² abflusswirksame Fläche und 88,4 m² Muldenfläche (Bemessung der Mulde auf $T = 10$ a, Bemessungsvorgang siehe Anhang A2)
- EZG3: Analog zu EZG1 1000 m² abflusswirksame Fläche, die allerdings an eine Mulde (EZG3.1) mit einer Fläche von 88,4 m² angeschlossen ist
- EZG4: 1088,4 m² EZG Fläche, aufgeteilt in 1000 m² abflusswirksame Fläche und 88,4 m² Muldenfläche

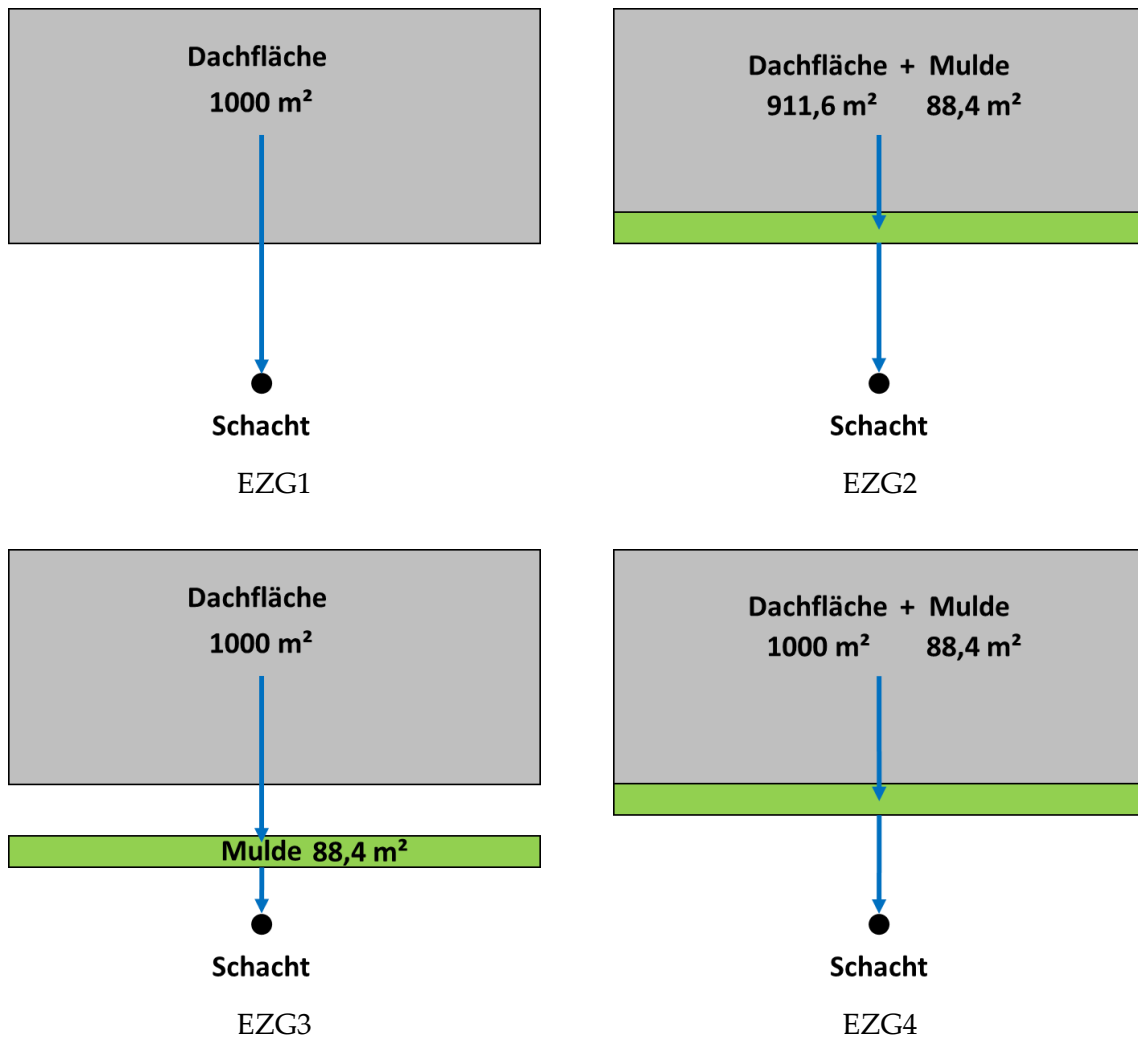


Abbildung 3-19: Implementierungsmöglichkeiten von Mulden

Um das Modellverhalten der unterschiedlichen Implementierungsarten miteinander zu vergleichen, wird eine Simulation mit einem Blockregen ($T = 50$ a, $D = 60$ min) durchgeführt. Die Simulationsergebnisse sind in Tabelle 3-43 dargestellt. Die Konfiguration EZG2, bei der die abflusswirksame Fläche (AC) um die Muldenfläche (A_M) verringert wird, simuliert einen geringeren Abfluss aus dem EZG und führt somit zu einem reduzierten Zufluss zur Mulde. Die Konfigurationen EZG3 und EZG4 führen zu den gleichen Ergebnissen, weisen aber folgende Unterschiede auf:

- Die Konfiguration EZG3 entspricht am ehesten der Realität, da die abflusswirksame Fläche (EZG3) und die Mulde (EZG3.1) in separaten EZG modelliert werden.
- Bei der Konfiguration EZG4 gibt es keine gesonderte Muldenfläche. Im Modell wird die Grünfläche, auf der die Mulde platziert sein müsste, überregnet und zusätzlich abflusswirksam. Dadurch wird der Abfluss von den Grünflächen in der Simulation leicht überschätzt.

Obwohl die Implementierung gemäß EZG3 am ehesten der Realität entspricht, wird der Implementierungsansatz nach Konfiguration EZG4 gewählt. Dieser hat den Vorteil, dass in das Modell kein extra EZG Objekt Mulde von Hand eingefügt werden muss, sondern direkt in dem bereits bestehenden EZG (z.B. eine Dachfläche) die Objekteinstellungen geändert werden können, um eine Mulde abzubilden. Die Versickerungsanlagen, Gründächer und Zisternentypen werden auf diese Weise in das Modell implementiert.

Tabelle 3-43: Simulationsergebnisse bei unterschiedlicher Implementierung von Mulden

| EZG | AC | Abfluss | Mulde | | | |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|--------------|----------|
| | | | A _M | Zufluss | Infiltration | Überlauf |
| - | [m ²] | [m ³] | [m ²] | [mm] | [mm] | [mm] |
| EZG1 | 1000 | 49,93 | - | - | - | - |
| EZG2 | 911,6 | 45,52 | 88,4 | 565,1 | 0,52 | 0,8 |
| EZG3 | 1000 | 49,93 | - | - | - | - |
| EZG3 Mulde | - | - | 88,4 | 615,04 | 0,56 | 1,15 |
| EZG4 | 1000 | 49,93 | 88,4 | 615,05 | 0,56 | 1,15 |

Im Modell wird der Abfluss aus den RWBA an den nächstgelegenen Schacht angeschlossen, wodurch die Verbindung zwischen den Anlagen und dem 1D/2D-Modell hergestellt wird. Der Abfluss ist bei den Versickerungsanlagen der Überlauf, bei den Gründächern der Drainageabfluss, bei den Zisternentypen der Überlauf sowie der Drosselabfluss und bei den modifizierten Straßenbäumen der Überlauf.

Modifizierte Straßenbäume

Im Gegensatz zu den anderen RWBA werden an die modifizierten Straßenbäume keine Dachflächen, sondern ausschließlich Straßenflächen angeschlossen. Bei der Dimensionierung wurde ermittelt, dass an einen hydrologisch optimierten Baumstandort 78 m² (siehe 3.5.4.1) und an eine Baumrigole 120 m² (siehe 3.5.4.2) Straßenfläche angeschlossen werden können. Für die Abbildung im Modell werden die Straßenflächen in 78 m² oder 120 m² Polygone aufgeteilt (Abbildung 3-20). Für das Untersuchungsgebiet sind die Standorte der 3256 Straßenbäume bekannt. Es wird angenommen, dass jeder Straßenbaum zu einem hydrologisch optimierten Baumstandort oder einer Baumrigole umfunktioniert werden kann. Im nächsten Schritt werden die Polygone ausgewählt, in denen ein Straßenbaum liegt. Die ausgewählten Polygone werden als *subcatchments* in das Modell importiert und entweder an einen hydrologisch optimierten Baumstandort oder eine Baumrigole angeschlossen.

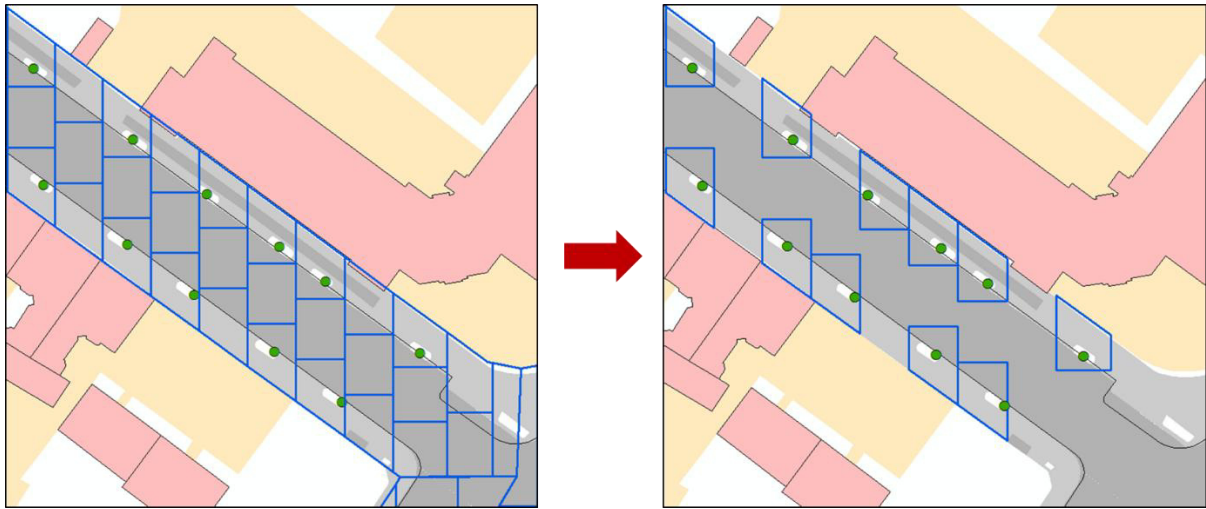


Abbildung 3-20: Links: Straßenfläche, aufgeteilt in 120 m² große Polygone (blau) und Standorte der Straßenbäume (grün). Rechts: Ausgewählte Polygone, die im Modell als *subcatchments* an die modifizierten Straßenbäume angeschlossen werden.

Im Modell befinden sich die *subcatchments* der modifizierten Straßenbäume über der *infiltration zone*, die die 2D-Oberfläche abbildet und ansonsten direkt berechnet wird. Niederschlag, der im Bereich der *subcatchments* im Straßenraum fällt, wird jetzt den modifizierten Straßenbäumen zugeführt und gelangt nicht auf die 2D Oberfläche. Bei einer Überlastung wird der Überlauf dem nächstgelegenen Schacht zugeführt. Die Straßenflächen, die nicht an modifizierte Straßenbäume angeschlossen sind, werden weiterhin direkt berechnet, und der Niederschlagsabfluss kann nach wie vor auf eine benachbarte Straßenfläche mit *subcatchment* fließen, da die darunterliegende *infiltration zone* weiterhin die 2D-Oberfläche abbildet, jedoch nicht direkt berechnet wird.

3.6.2 Räumliche Anordnung

Im Modell werden die RWBA nach zwei Ansätzen angeordnet, die in Abbildung 3-21 am Beispiel der Gründächer dargestellt sind:

1. Heterogene Verteilung: 50 % der Dächer werden als Gründächer ausgeführt
2. Homogene Verteilung: 50 % jeder einzelnen Dachfläche wird als Gründach umgesetzt

Der zweite Ansatz ist eher theoretisch, bietet jedoch für die modelltechnische Umsetzung Vorteile, da die manuelle Auswahl einzelner Dächer entfällt und stattdessen der Grndachanteil prozentual angepasst werden kann. Diese beiden Implementierungsansätze lassen sich grundsätzlich auch auf andere RWBA, wie beispielsweise Mulden, übertragen.



Abbildung 3-21: Links: Heterogene Verteilung der RWBA (50 % der Dächer als Gründächer ausgeführt); rechts: Homogene Verteilung der RWBA (50 % jeder Dachfläche als Gründach ausgeführt)

3.7 Modellanwendung und Kriterien zur Auswertung der Ergebnisse

Um die Wirkung der RWBA zur Starkregenvorsorge zu bestimmen, werden in den Simulationsmodellen Szenarien mit und ohne die Berücksichtigung von RWBA berechnet und anschließend die Simulationsergebnisse miteinander verglichen. Im Folgenden werden die Kriterien beschrieben, anhand derer die Überflutungsminderung durch RWBA quantifiziert und analysiert wird. Die Ergebnisse werden in den Kapiteln 4 und 5 dargestellt und diskutiert.

Überflutungsvolumen im Gesamtgebiet

Mit der Simulationssoftware wird der Wasserstand an der Oberfläche für jedes Berechnungselement (*mesh element*) des Oberflächengitters simuliert. Die einzelnen Elemente haben dabei eine Größe von ca. 1 m². Die während des Simulationszeitraums maximal aufgetretenen Wasserstände (Worst-Case-Betrachtung, üblich bei Starkregengefahrenkarten) im gesamten Untersuchungsgebiet werden in Anlehnung an die Gefahrenklassen aus dem Merkblatt DWA-M 119 (DWA 2016) ab einer Überflutungshöhe von 10 cm als überflutungsrelevant herangezogen. Das Überflutungsvolumen je Element berechnet sich aus dem zugehörigen maximalen Wasserstand multipliziert mit der Elementfläche. Aufsummiert ergibt sich das Überflutungsvolumen des Gesamtgebiets. Dabei werden die maximalen Volumina addiert, auch wenn sie zeitlich versetzt aufgetreten sind (Worst-Case-Betrachtung).

Überflutungsvolumen im Überflutungsschwerpunkt

In topografischen Senkenlagen konzentriert sich der Niederschlagsabfluss: Hier treten in der Regel die höchsten Wasserstände und somit die größte Überflutungsgefährdung auf. Für die Bewertung des Überflutungszustands sind diese Senkenlagen als Überflutungsschwerpunkte von besonderer Relevanz, weshalb das Überflutungsbild im Überflutungsschwerpunkt analysiert wird. Die Bewertung erfolgt dabei visuell, wobei die maximalen Wasserstände farblich abgestuft dargestellt werden.

Verhalten der RWBA

Als Simulationsergebnisse liegen für die einzelnen RWBA unter anderem die Anteile von Zulauf, Infiltration, Überlauf und Drainageabfluss sowohl als Gesamtmenge als auch in zeitlicher Auflösung vor. In Tabelle 3-44 sind die Anlagen mit den zugehörigen Abflusskomponenten aufgelistet. Zudem sind für alle Anlagen die Anfangs- und Endspeicherfüllung bekannt. Für das Überflutungsgeschehen sind der Überlauf und Drainageabfluss der RWBA relevant, da diese direkt dem Kanalnetz zugeführt werden. Das Überlauf- und Drainageabflussvolumen wird für jede Anlage über den Simulationszeitraum aufsummiert. Daraus ergibt sich das Gesamtvolumen von Überlauf und Drainageabfluss.

Tabelle 3-44: Abflusskomponenten der RWBA

| SUDS-Element | RWBA | Infiltration* | Überlauf | Drainageabfluss |
|----------------------------|--------------------------|---------------|----------|-----------------|
| <i>rain garden</i> | Versickerungsmulde | x | x | - |
| | Hydr. opt. Baumstandort | x | x | - |
| <i>infiltration trench</i> | Mulden-Rigolen-Element | x | x | - |
| <i>bio-retention cell</i> | Retentionsdach | - | x | x |
| | Baumrigole | x | x | - |
| <i>green roof</i> | Extensives Gründach | - | x | x |
| | Intensives Gründach | - | x | x |
| <i>rain barrel</i> | Rigole | x | x | - |
| | Zisterne | - | x | - |
| | Retentionszisterne unge. | - | x | - |
| | Retentionszisterne gedr. | - | x | x** |

* Mit Infiltration ist hier die Perkolation in den Untergrund gemeint

** Im Fall der Retentionszisterne ist der Drainageabfluss der Drosselabfluss

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse aus dem Untersuchungsgebiet zur Bearbeitung der Forschungsziele vorgestellt (siehe Kapitel 1.2). Eine Ausnahme bildet das letzte Ziel – die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Einzugsgebiete –, das in Kapitel 5 behandelt wird. Die Ergebnisse werden im Kontext des aktuellen Wissensstands zur Wirksamkeit von RWBA zur Starkregenvorsorge (siehe Kapitel 2.5) diskutiert.

4.1 Vergleich der Überflutungsminderung durch die Regenwasserbewirtschaftungsanlagen

In Abbildung 4-1 ist die Reduzierung des Überflutungsvolumens im Untersuchungsgebiet durch die RWBA im Vergleich zum Referenzmodell bei einem Implementierungsgrad von 100 % und der Niederschlagsbelastung R1E ($T = 100$ a, $h_N = 48,9$ mm) dargestellt. Des Weiteren ist die Summe aus Überlauf- und Drainage- oder Drosselabflussvolumen dargestellt (vgl. Tabelle 3-44). Die zugehörigen Zahlenwerte sind im Anhang A11 gegeben. Zur Veranschaulichung des Effekts der Anlagen zeigt Abbildung 4-2 die maximalen Wasserstände des Referenzmodells sowie von drei Anlagen im Überflutungsschwerpunkt des Untersuchungsgebiets. Es wird bewusst nur ein Teil des Untersuchungsgebiets gezeigt, da Unterschiede in den maximalen Wasserständen im Gesamtgebiet nicht ausreichend erkennbar wären.

Ein Implementierungsgrad von 100 % bedeutet, dass alle Dachflächen vollständig an die RWBA angeschlossen oder die Dachflächen vollständig als Gründächer ausgeführt sind. Eine Ausnahme bilden die modifizierten Straßenbäume, an die Straßenfläche statt Dachfläche angeschlossen ist (siehe Kapitel 3.6.1).

Im Fall der Niederschlagsbelastung R1E reduzieren die auf $T = 5$ a bemessenen Versickerungsanlagen das Überflutungsvolumen um 21,6 % - 24,8 %, wobei die Mulden-Rigolen-Elemente die höchste Reduktion erzielen. Im Folgenden werden die auf $T = 5$ a und 100 a bemessenen Versickerungsanlagen nur noch als Mulden 5 a/100 a, Rigolen 5 a/100 a und Mulden-Rigolen-Elemente 5 a/100 a bezeichnet. Obwohl die Anlagen nur auf ein 5-jährliches Niederschlagsereignis dimensioniert sind, können sie auch beim 100-jährlichen Ereignis das Überflutungsvolumen deutlich reduzieren. Die Versickerungsanlagen 100 a halten den Abfluss vollständig zurück und reduzieren das Überflutungsvolumen um 32,3 % - 33,8 %. Der Grund dafür ist das größere Speichervolumen: Im Vergleich zu den Versickerungsanlagen 5 a ist das Speichervolumen ca. doppelt so groß.

Die intensiven Gründächer und die Retentionsdächer halten den Niederschlag ebenfalls vollständig zurück, wobei das Überflutungsvolumen um 33,7 % reduziert wird. Nur bei den extensiven Gründächern mit einer Reduktion von 31,8 % tritt Drainageab-

fluss auf. Grund dafür ist die geringere Substratschicht, die bei den extensiven Gründächern nur 15 cm beträgt (30 cm bei den intensiven Gründächern) und somit weniger Niederschlag zwischenspeichern kann.

Bei den verschiedenen Zisternentypen erreichen die Zisternen lediglich eine Reduktion von 10,7 %, da ihr Nutzvolumen nur auf eine Gesamtniederschlagsmenge von 23,7 mm ausgelegt ist und zusätzlich davon ausgegangen wird, dass sie bei Ereignisbeginn zur Hälfte gefüllt sind. Die Retentionszisternen erzielen eine deutlich größere Reduktion des Überflutungsvolumens mit 27,3 % und 31,5 %. Der Grund dafür ist, dass neben dem Nutzvolumen noch ein Retentionsvolumen von 25 mm vorhanden ist. Im Vergleich zwischen der ungedrosselten und der gedrosselten Retentionszisterne erzielt die ungedrosselte Variante die größere Reduktion, weil das Retentionsvolumen vollständig ausgenutzt wird und erst danach ein Überlauf auftritt. Bei der gedrosselten Variante beginnt ab Vollerfüllung des Nutzvolumens der Drosselabfluss in das Kanalnetz.

Die HOB und die Baumrigolen reduzieren das Überflutungsvolumen um 4,3 % und 7 % und haben somit unter den untersuchten RWBA den geringsten Effekt zur Überflutungsminderung. Dabei muss allerdings die angeschlossene befestigte Fläche berücksichtigt werden: An die HOB werden 25,4 ha Straßenfläche, an die Baumrigolen 39,1 ha Straßenfläche und von den anderen RWBA 97,8 ha Dachfläche bewirtschaftet. Bezogen auf die befestigte Fläche reduzieren die HOB das Überflutungsvolumen um 0,17 %/ha, die Baumrigolen um 0,18 %/ha, die Mulden 5 a um 0,22 %/ha und die Retentionsdächer um 0,35 %/ha. Auch in Relation zur befestigten Fläche haben die modifizierten Straßenbäume den geringsten Effekt zur Überflutungsminderung.

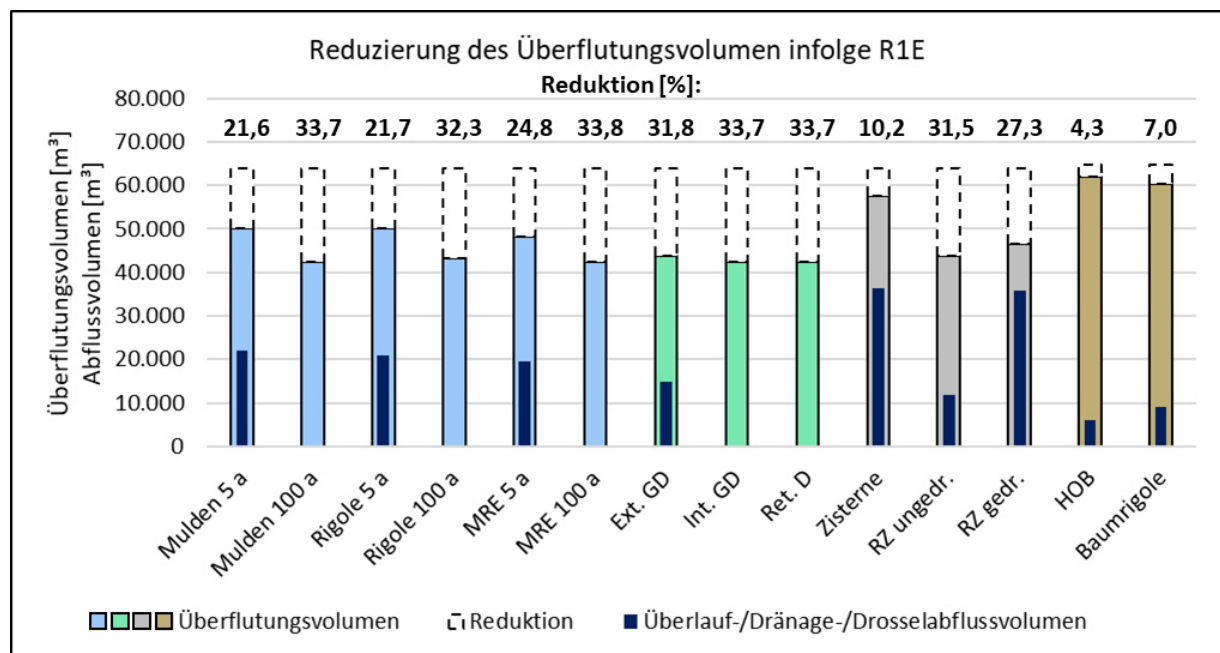


Abbildung 4-1: Simulationsergebnisse infolge R1E bei einem RWBA Implementierungsgrad von 100 % für Versickerungsanlagen (blau), Gründächer (türkis), Zisternenarten (grau) und modifizierte Straßenbäume (braun)

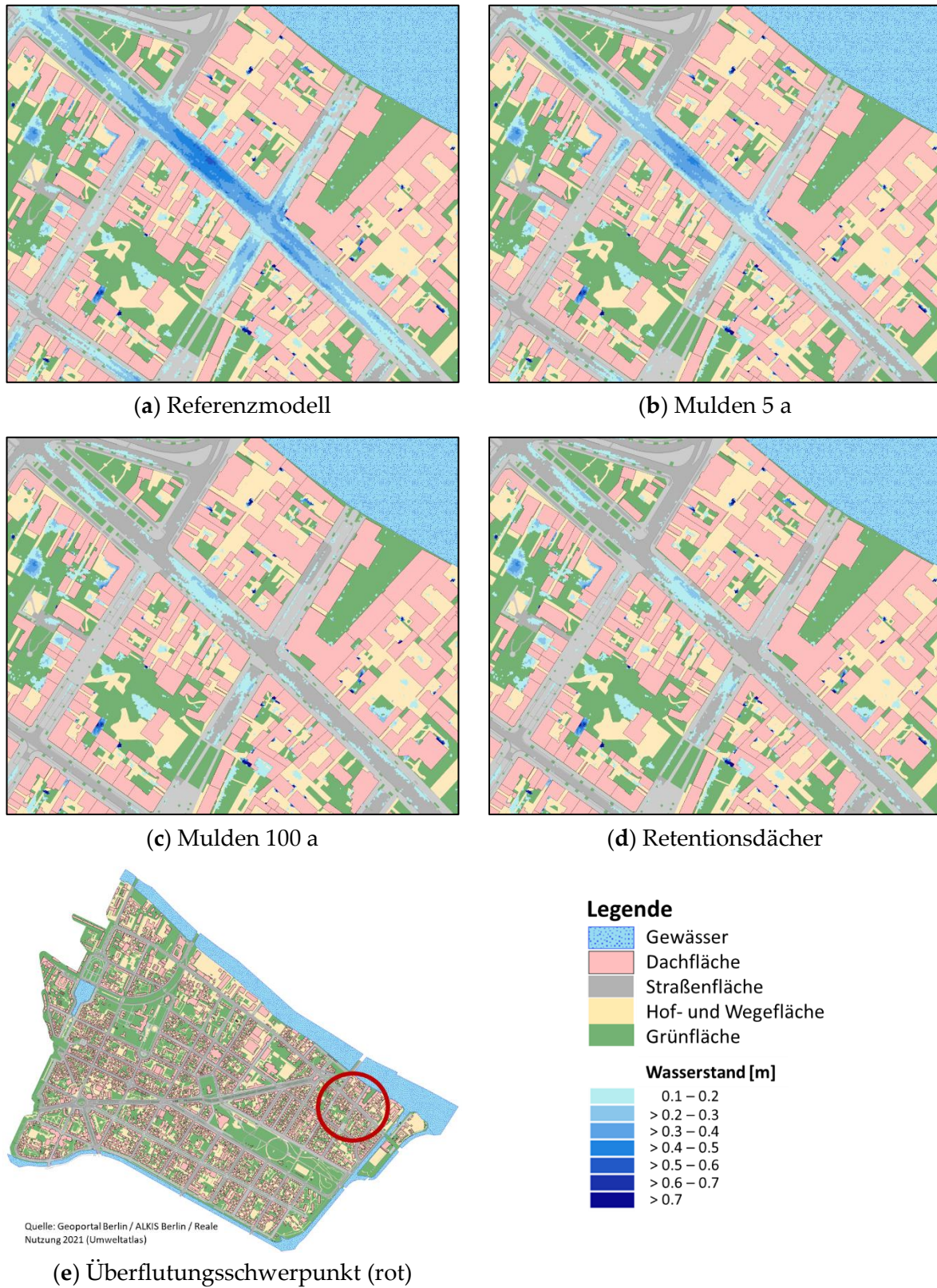


Abbildung 4-2: Maximale Wasserstände im Überflutungsschwerpunkt infolge R1E für das Referenzmodell und den RWBA (Implementierungsgrad 100 %)

In Abbildung 4-3 sind analog zum vorherigen Abschnitt die Simulationsergebnisse für R2E ($h_N = 100$ mm, $D = 60$ min) dargestellt. Die zugehörigen Zahlenwerte sind im Anhang A11 angegeben. Abbildung 4-4 zeigt den Rückgang des Überflutungsgeschehens durch Mulden 5 a und 100 a sowie Retentionsdächer. Dieses extreme Niederschlagsereignis übersteigt die Kapazität aller untersuchten Versickerungsanlagen. Die Versickerungsanlagen 5 a können das Überflutungsvolumen nur noch um 5,4 % bis 9,3 % reduzieren und sind somit deutlich weniger wirkungsvoll als noch bei R1E. In der Literatur ist allgemein bekannt, dass der Effekt von RWBA zur Überflutungsminderung mit steigender Intensität von Niederschlagsereignissen abnimmt (u. a. Costa et al. 2021, Ortega Sandoval et al. 2023, Mugume et al. 2024). Allerdings reduzieren die Versickerungsanlagen 100 a das Überflutungsvolumen immer noch um 15,1 % - 25,8 %, was im Vergleich zu den Anlagen 5 a eine etwa dreifach größere Reduktion darstellt. Die auf 100 a dimensionierten Versickerungsanlagen können auch im Fall des Extremereignisses R2E eine deutliche Reduzierung des Überflutungsvolumens erzielen.

Bei den Gründächern reduzieren die Retentionsdächer das Überflutungsvolumen um 33,6 % und halten das 100 mm Niederschlagsereignis vollständig zurück. Dies war zu erwarten, da schon die Retentionsschicht eine effektive Speicherhöhe von 90 mm aufweist. Die intensiven Gründächer haben eine ähnlich hohe Wirkung mit einer Reduktion von 33,5 %, allerdings kommt es zu einem Drainageabflussvolumen von 4.200 m³. Die Rückhaltekapazität der extensiven Gründächer wird deutlich überschritten, sie reduzieren das Überflutungsvolumen nur noch um 13,8 %. Im Vergleich zu den Versickerungsanlagen kommt die Wirkung der extensiven Gründächer der Wirkung von Mulden 100 a nahe. Die Wirkung der intensiven Gründächer und Retentionsdächer entspricht einer Dimensionierung auf eine Jährlichkeit von $T \gg 100$ a.

Die Zisternen reduzieren das Überflutungsvolumen nur um 2,7 %, ihre Wirkung bei R2E ist vernachlässigbar. Die Retentionszisternen erreichen eine Reduktion von 11,9 % und 12,4 %. Interessant dabei ist, dass im Gegensatz zu R1E eine größere Überflutungsminderung durch die gedrosselte Variante erreicht wird, obwohl das Gesamtabflussvolumen (Summe aus Drosselabfluss- und Überlaufvolumen) mit 72.157 m³ größer ist als das Überlaufvolumen der ungedrosselten Variante von 61.778 m³. Durch den Drosselabfluss wird dem Kanalnetz ein geringerer Abfluss über einen längeren Zeitraum zugeführt. Bei der ungedrosselten Variante hingegen tritt ab der Vollfüllung des Retentionsvolumens ein großer Abfluss innerhalb kurzer Zeit ins Kanalnetz ein. Dieser starke Abfluss in kurzer Zeit führt zu einer stärkeren Überlastung des Kanalnetzes und somit zu einem größeren Überflutungsvolumen. Wenn das Zuflussvolumen die Speicherkapazität der Retentionszisterne übersteigt, ist eine gedrosselte Ausführung der Retentionszisterne im Hinblick auf die Überflutungsminderung von Vorteil. Im Vergleich zu den Versickerungsanlagen liegt die Wirkung der Retentionszisternen unter der Wirkung der Mulden 100 a.

Die HOB und die Baumrigolen reduzieren das Überflutungsvolumen lediglich um 1,6 % und 2,2 % und sind somit als Maßnahmen zur Überflutungsminderung im Fall von R2E ungeeignet.

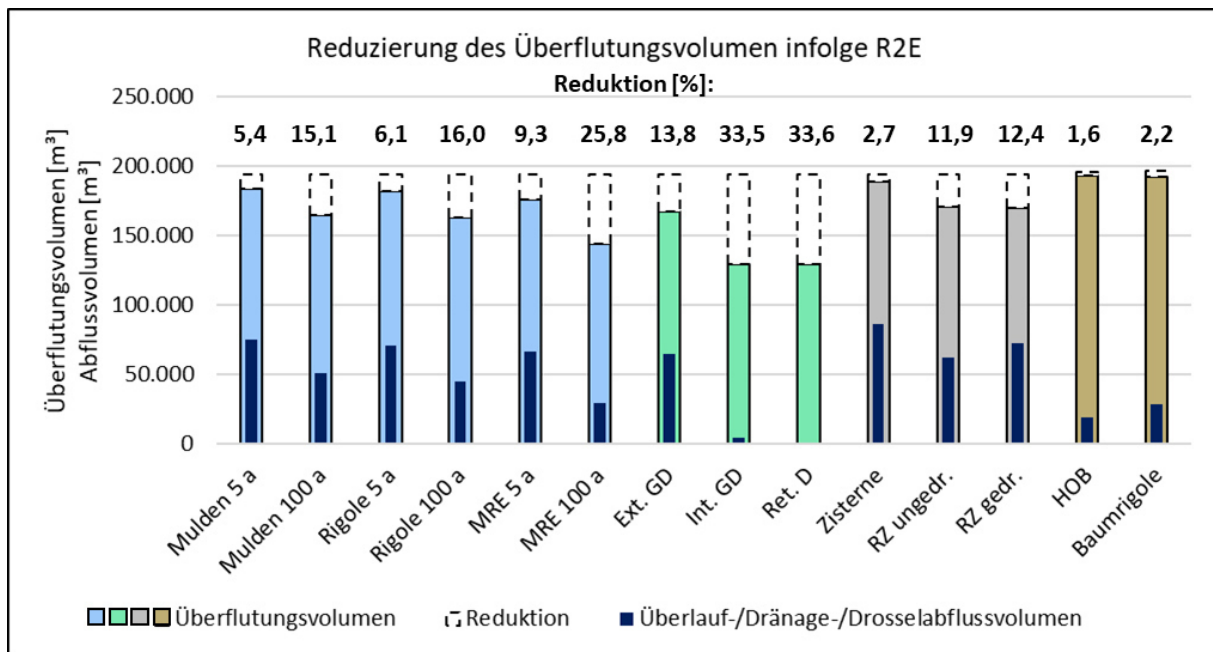


Abbildung 4-3: Simulationsergebnisse infolge R2E bei einem RWBA Implementierungsgrad von 100 % für Versickerungsanlagen (blau), Gründächer (türkis), Zisternenarten (grau) und modifizierte Straßenbäume (braun)

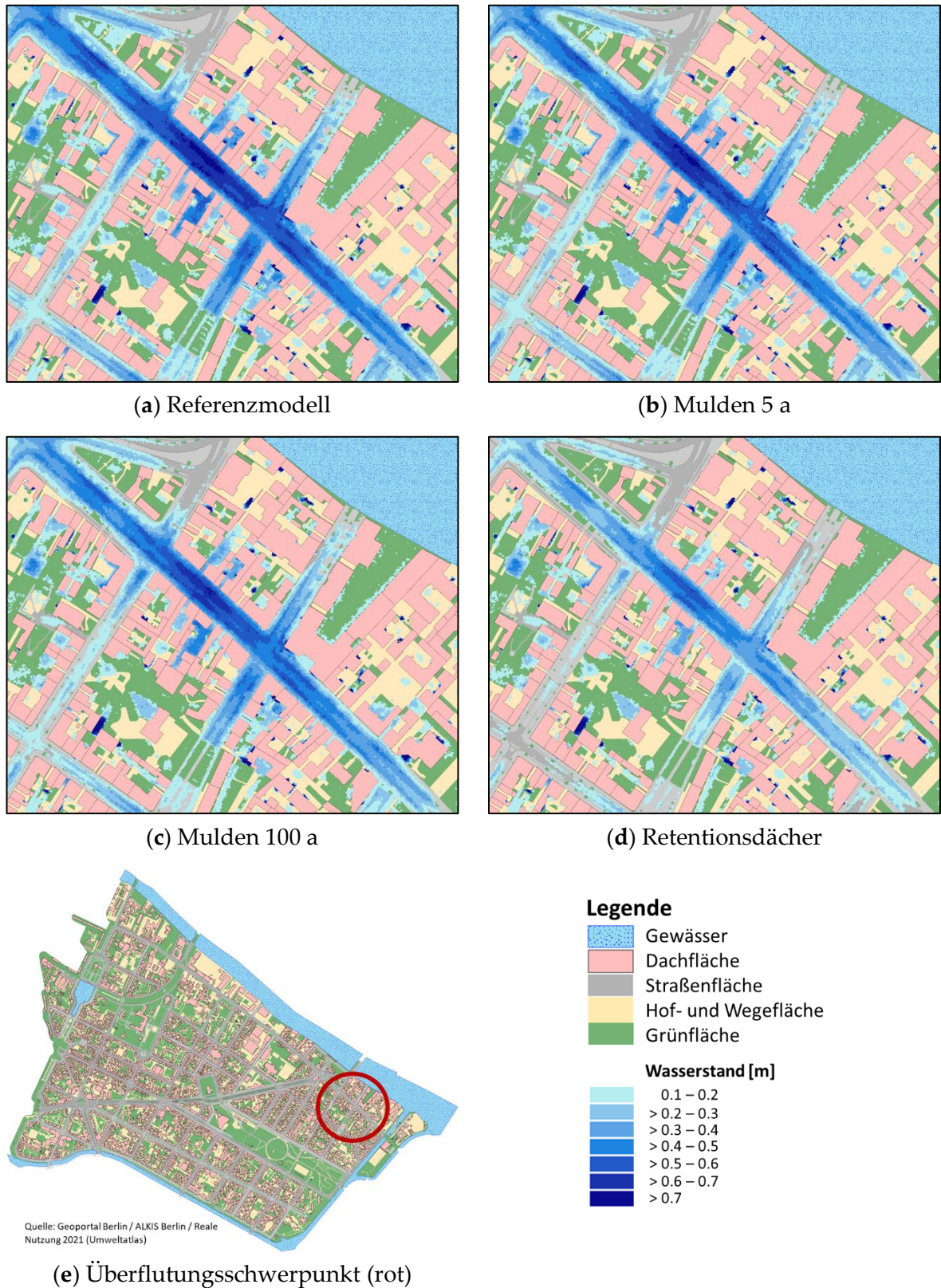


Abbildung 4-4: Maximale Wasserstände im Überflutungsschwerpunkt infolge R2E für das Referenzmodell und den RWBA (Implementierungsgrad 100 %)

Diskussion im Zusammenhang mit Literaturergebnissen

Die Literaturrecherche (Kapitel 2.5) zeigt, dass von den verschiedenen Anlagentypen am häufigsten der Effekt von Versickerungsanlagen zur Überflutungsminderung untersucht wird. Dabei werden insbesondere *swales* und *rain gardens* analysiert, die den Versickerungsmulden entsprechen. Zudem werden *bio-retention cells* untersucht, die als Tiefbeetrigolen übersetzt werden können und am ehesten mit Mulden-Rigolen-Elementen vergleichbar sind. In keiner der untersuchten Publikationen werden Anlagen analysiert, die sich direkt mit Rigolen vergleichen lassen. In den Studien werden meist Szenarien mit verschiedenen Kombinationen von RWBA simuliert, wodurch keine Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit einzelner Anlagentypen möglich sind. Lediglich Mei et al. (2018) vergleichen den Effekt von Mulden und Tiefbeetrigolen zur Überflutungsminderung bei einem 100 jährlichen Regenereignis in separaten Szenarien. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die Tiefbeetrigolen im Verhältnis zur Anlagengröße das Überflutungsvolumen deutlich stärker reduzieren können als die Mulden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen dieser Arbeit, wonach Mulden-Rigolen-Elemente bei geringerem Flächenverbrauch eine größere Überflutungsminderung erzielen.

Der Effekt von Gründächern zur Überflutungsminderung wird in zahlreichen Studien untersucht. Allerdings werden dabei nur extensive Gründächer modelliert, während der Einfluss intensiver Gründächer und Retentionsdächer nicht analysiert wird. Wie bei den Versickerungsanlagen besteht das Problem, dass die Gründächer meist in Kombination mit anderen RWBA simuliert werden. Lediglich Costa et al. (2021) analysieren den Effekt von extensiven Gründächern in einem eigenen Szenario und vergleichen ihn mit der Wirkung von Rasengittersteinen. Unter Berücksichtigung der bewirtschafteten befestigten Fläche erzielen die extensiven Gründächer eine größere Überflutungsminderung.

In dieser Arbeit erweisen sich Zisternen als weniger leistungsfähig als die Versickerungsanlagen 5 a, während Retentionszisternen in ihrer Wirkung zwischen den Versickerungsanlagen 5 a und 100 a. Mugume et al. (2024) untersuchen den Effekt verschiedener RWBA zur Überflutungsminderung bei einem 100 jährlichen Regenereignis. Sie kommen zu dem Schluss, dass Zisternen den größten Effekt zur Überflutungsminderung haben und auch bei der Kosten-Nutzen-Analyse am besten abschneiden. Ortega Sandoval et al. (2023) analysieren ebenfalls den Effekt von Zisternen und zeigen deren Wirksamkeit zur Überflutungsreduzierung auf. Die Diskrepanz zwischen den Ergebnissen dieser Arbeit und den beiden Publikationen lässt sich durch die unterschiedlichen Dimensionierungsansätze und die gewählten Randbedingungen erklären: In dieser Arbeit wird zu Beginn des Starkregenereignisses von zur Hälfte gefüllten Zisternen ausgegangen, während in den beiden Publikationen leere Zisternen als Ausgangszustand angenommen werden. Da die primäre Funktion von Zisternen die Bereitstellung von Wasser ist, sollte dies bei der Wahl der Randbedingungen berücksichtigt werden. Wenn sie gezielt als Rückhalteraum genutzt werden sollen, muss eine Entleerung bei Warnung vor Starkregen automatisiert erfolgen.

Der hydrologische Baumstandort und die Baumrigole haben von allen in dieser Arbeit untersuchten RWBA den geringsten Effekt zur Überflutungsreduzierung, beim intensiveren Regenereignis mit einer Niederschlagshöhe von 100 mm ist ihr Einfluss sogar vernachlässigbar. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Webber et al. (2020) und Ortega Sandoval et al. (2023), die Baumrigolen in verschiedenen Szenarien untersucht haben und nur eine sehr geringe Überflutungsminde rung feststellen konnten.

4.2 Einfluss des Implementierungsgrades der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen

Im Folgenden wird die Reduzierung des Überflutungsvolumens in Abhängigkeit des Implementierungsgrades am Beispiel der Mulden 5 a, Mulden 100 a, der MRE 100 a und der intensiven Gründächer beschrieben und diskutiert. Es wird von einer homogenen Verteilung der RWBA im Untersuchungsgebiet ausgegangen (siehe Kapitel 3.6.2).

In Abbildung 4-5 ist die Reduzierung des Überflutungsvolumens durch RWBA für verschiedene Implementierungsgrade infolge R1E dargestellt. Über den einzelnen Balken ist jeweils die prozentuale Reduzierung des Überflutungsvolumens in der Reihenfolge von oben links (Mulden 5 a) bis unten rechts (intensive Gründächer) aufgetragen.

Die Mulden 5 a reduzieren das Überflutungsvolumen in Abhängigkeit vom Implementierungsgrad um 6,1 % bis 21,6 %. Vergleicht man die Reduktion innerhalb der Implementierungsschritte (0 % - 25 %, 25 % - 50 %, usw.) nimmt diese dabei ab.: Bei einem Implementierungsgrad von 25 % beträgt die Reduktion noch 6,1 %, beim Implementierungsschritt von 75 % auf 100 % nur noch 4,3 % (von 17,3 % auf 21,6 %). Dieser nicht lineare Zusammenhang ist noch deutlicher bei den Mulden 100 a, den Mulden-Rigolen-Elementen 100 a und den intensiven Gründächern zu erkennen, die fast identische Reduktionen erzielen. Bei einem Implementierungsgrad von 25 % beträgt die Reduktion 12,2 %, bei der Erhöhung von 75 % auf 100 % lediglich noch 3,5 % - 3,7 % (von 30,2 % auf 33,7 % und 30,1 auf 33,8).

Beim Niederschlagsereignis R1E haben niedrigere Implementierungsschritte eine vergleichsweise größere Wirkung auf die Überflutungsminde rung als hohe Implementierungsschritte. Dieser Effekt ist bei den leistungsfähigeren Anlagen Mulden 100 a, Mulden-Rigolen-Elemente 100 a und intensiven Gründächern ausgeprägter als bei den Mulden 5 a. Der Grund dafür ist die Kapazität des Kanalnetzsystems: Das System ohne RWBA ist nur leicht überlastet. Bereits ein geringer Implementierungsschritt von RWBA führt zu einem deutlichen Rückgang der Auslastung und somit der Überflutung. Noch höhere Implementierungsschritte haben eine geringere Wirkung, da die Überflutung bereits zuvor nicht mehr so stark ausgeprägt ist.

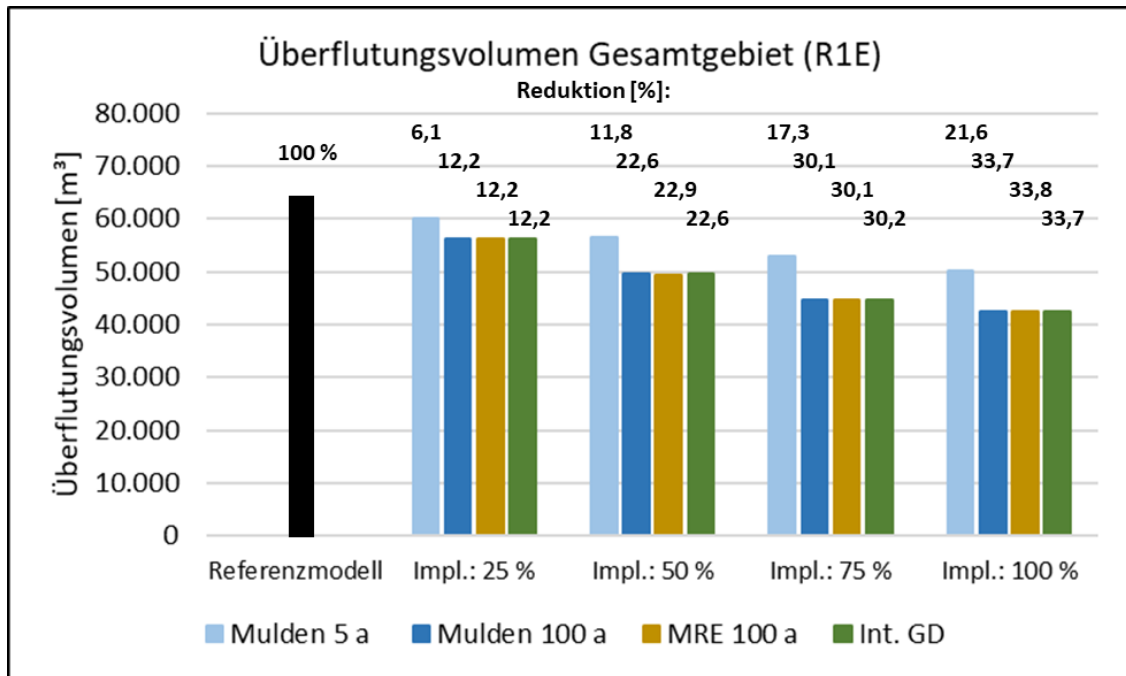


Abbildung 4-5: Reduzierung des Überflutungsvolumen durch RWBA in Abhängigkeit des Implementierungsgrades infolge R1E

Für einen visuellen Eindruck des Überflutungsgeschehens und dessen Reduzierung durch die RWBA sind in Abbildung 4-6 die maximalen Wasserstände im Überflutungsschwerpunkt des Untersuchungsgebiets infolge von R1E für das Referenzmodell und die Mulden 100 a mit zwei Implementierungsgraden dargestellt. Der Vergleich zeigt eine deutliche Verringerung der Überflutung durch die Mulden 100 a. Die schwarzen Pfeile in den Abbildungen markieren den tiefsten Punkt im Straßenraum. Hier beträgt der maximale Wasserstand 56 cm im Referenzmodell und 46 cm und 28 cm bei den Mulden 100 a mit Implementierungsgraden von 50 % und 100 %. Die Mulden reduzieren den maximalen Wasserstand somit um 10 cm und 28 cm.

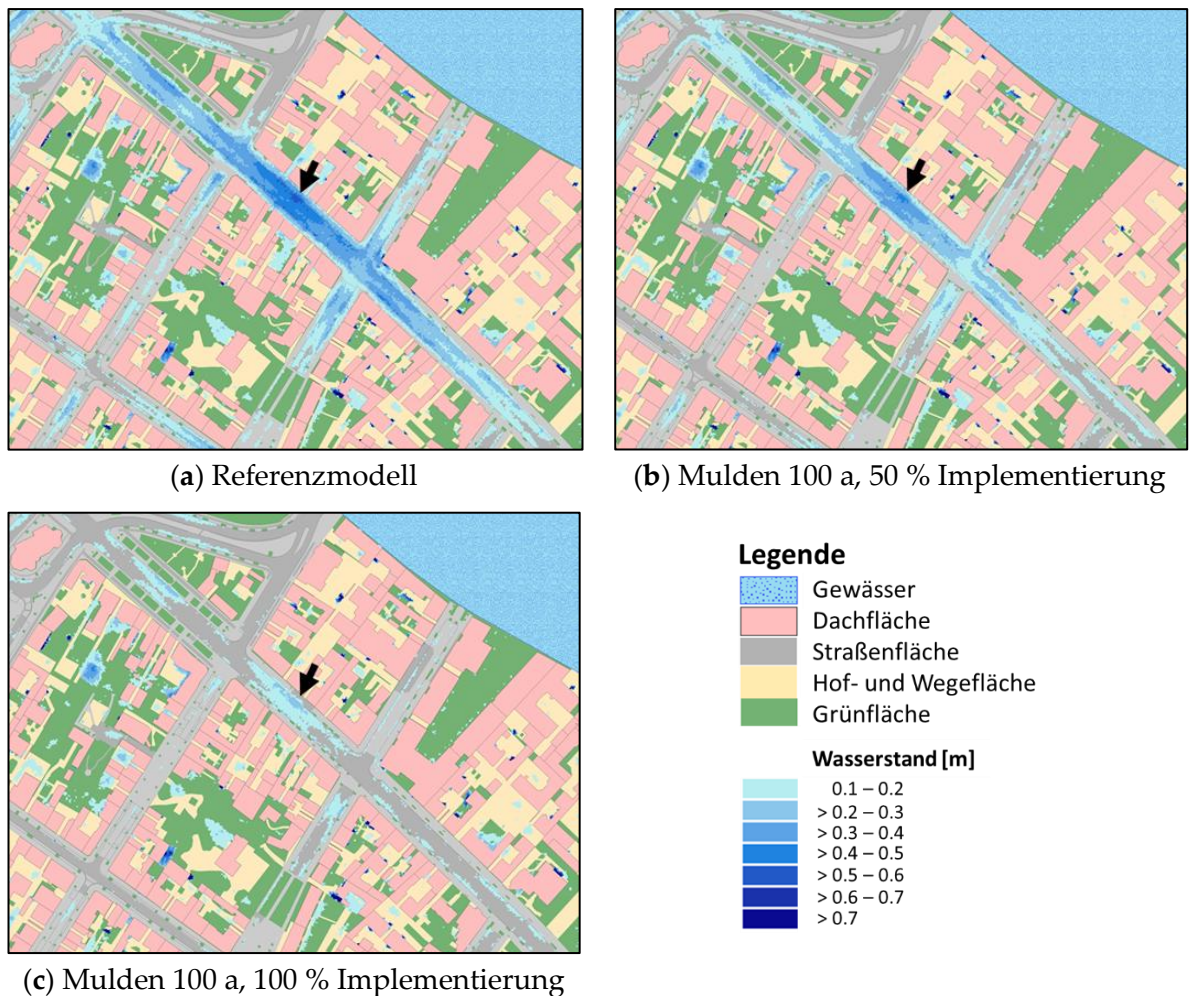


Abbildung 4-6: Maximale Wasserstände im Überflutungsschwerpunkt infolge R1E. Die schwarzen Pfeile markieren den tiefsten Punkt im Straßenraum

In Abbildung 4-7 ist analog zum vorherigen Abschnitt die Reduzierung des Überflutungsvolumens durch RWBA für verschiedene Implementierungsgrade infolge von R2E dargestellt.

Im Fall des intensiveren Niederschlagsereignisses unterscheiden sich die vier RWBA deutlich in ihrer Wirkung zur Überflutungsreduzierung. Betrachtet man allerdings die Anlagentypen isoliert, lässt sich bei den Mulden 5 a und 100 a ein annähernd linearer Rückgang des Überflutungsvolumens in Abhängigkeit vom Implementierungsgrad feststellen. Dazu ist in Tabelle 4-1 die Reduktion des Überflutungsvolumen je Implementierungsschritt angegeben. Bei den Mulden 5 a liegt diese bei 1,3 % und 1,5 % und bei den Mulden 100 a zwischen 3,9 % und 3,7 %. Bei den leistungsfähigeren Mulden-Rigolen-Elemente 100 a beträgt die Reduktion zwischen 7,3 % bis 5,1 % und bei den intensiven Gründächern zwischen 9,8 % bis 6,8 %. Die Reduktion je Implementierungsschritt sinkt, jedoch deutlich weniger stark im Vergleich zu R1E.

Im Fall des 100 mm Niederschlagsereignis R2E ist das Kanalnetz weit über seine Kapazität hinaus ausgelastet, es kommt zu schweren Überflutungen. Die weniger leistungsfähigeren Mulden 5 a und 100 a sind nicht in der Lage das Kanalnetz ausreichend

zu entlasten, selbst bei einem Implementierungsgrad von 100 % ist es stark überlastet und die Überflutung weiterhin ausgeprägt. Daraus resultiert der lineare Zusammenhang zwischen Reduktion des Überflutungsvolumens und dem Implementierungsgrad. Die performanteren Mulden-Rigolen-Elemente 100 a und intensiven Gründächern können das Kanalnetz so weit entlasten, dass die Überflutung bereits stärker bei niedrigeren Implementierungsgraden zurückgeht. Höhere Implementierungsschritte haben dadurch eine geringere Wirkung zur Überflutungsreduzierung.

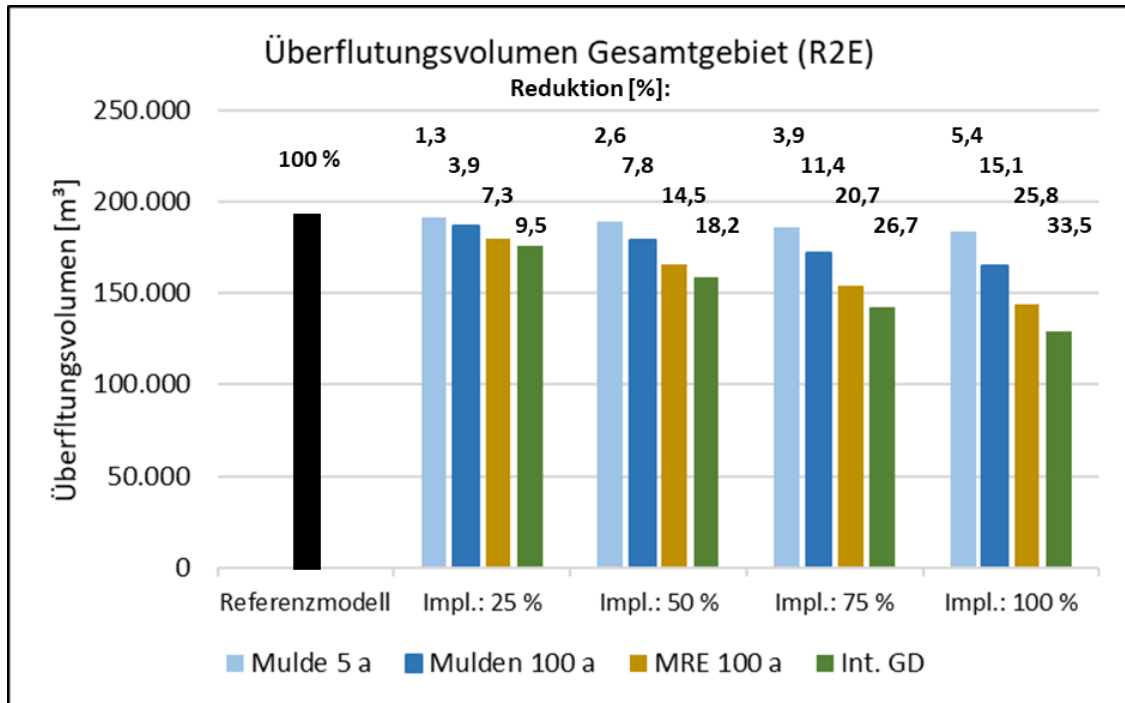


Abbildung 4-7: Reduzierung des Überflutungsvolumen durch RWBA in Abhängigkeit des Implementierungsgrades infolge R2E

Tabelle 4-1: Reduktion des Überflutungsvolumens je Implementierungsschritt

| RWBA | Reduktion [%] je Implementierungsschritt | | | |
|--------------|--|-------------|-------------|--------------|
| | 0 % - 25 % | 25 % - 50 % | 50 % - 75 % | 75 % - 100 % |
| Mulden 5 a | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,5 |
| Mulden 100 a | 3,9 | 3,9 | 3,6 | 3,7 |
| MRE 100 a | 7,3 | 7,2 | 6,2 | 5,1 |
| Int. GD | 9,5 | 8,7 | 8,5 | 6,8 |

Diskussion im Zusammenhang mit Literaturergebnissen

Die Ergebnisse bestätigen die einhellige Fachmeinung, dass mit der Erhöhung der bewirtschafteten Fläche der Effekt der Anlagen zunimmt (Ortega Sandoval et al. 2023, Cui et al. 2019, Ahiablame und Shakya 2016). Ansonsten konnten in der Literatur-

recherche keine Publikationen identifiziert werden, in denen die Implementierungsgrade einzelner Anlagen systematisch erhöht und ihre überflutungsmindernden Effekte analysiert werden.

4.3 Einfluss der zeitlichen Niederschlagsverteilung

In diesem Kapitel wird der Einfluss der zeitlichen Niederschlagsverteilung auf die Wirkung von RWBA zur Überflutungsminderung untersucht. Dazu ist in Abbildung 4-8 das Überflutungsvolumen infolge einer Euler Typ 2 und einer Blockregenbelastung für das Referenzmodell und die RWBA bei einem Implementierungsgrad von 100 % dargestellt. Zusätzlich ist der prozentuale Unterschied des Überflutungsvolumens zwischen den Verteilungen angegeben. Beide Niederschlagsbelastungen haben eine Niederschlagshöhe von $h_N = 48,9$ mm und eine Dauer $D = 60$ min, sie unterscheiden sich lediglich hinsichtlich ihrer zeitlichen Verteilung.

Die gewählte Niederschlagsverteilung hat einen starken Einfluss auf das simulierte Überflutungsvolumen: Der prozentuale Unterschied des Überflutungsvolumens zwischen den Verteilungen beträgt beim Referenzmodell 31 % und bei den RWBA 13,5 % bis 31,3 %. Das entspricht in etwa der Größenordnung der Überflutungsreduzierung durch die RWBA bei einem Implementierungsgrad von 100 % (siehe Abbildung 4-1, ausgenommen Zisternen und modifizierte Straßenbäume). Der Grund für den deutlichen Unterschied ist die ausgeprägte Intensitätsspitze des Euler Regens, die zu höheren maximalen Wasserständen führt. Diese sind maßgeblich für die Berechnung des Überflutungsvolumens (maximaler Wasserstand, der während des Simulationszeitraums aufgetreten ist, multipliziert mit der Berechnungselementfläche). Im Gegensatz dazu ist die Intensität bei der Blockregenverteilung über die gesamte Regendauer konstant (vgl. Abbildung 3-8).

Bei den Versickerungsanlagen 5 a beträgt der prozentuale Unterschied des Überflutungsvolumens 18,2 % bis 20,2 %. bei den Versickerungsanlagen 100 a ist er mit 17,8 % bis 18,7 % leicht geringer. Der Grund dafür ist, dass selbst bei der Euler Typ 2 Verteilung die Überflutung wegen des Implementierungsgrades von 100 % nicht so gravierend ausfällt und somit der Unterschied zwischen den Verteilungen prozentual geringer ausfällt. Dieser Effekt tritt auch bei den intensiven Grün- und Retentionsdächern auf, bei denen der prozentuale Unterschied ebenfalls 17,8 % beträgt. Bei den extensiven Gründächern liegt er etwas darunter bei 14,5 %. Bei den Versickerungsanlagen und Gründächern ist der prozentuale Unterschied des Überflutungsvolumens recht ähnlich, was darauf hindeutet, dass die Anlagen im Vergleich zueinander ähnlich auf die unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen reagieren. Im Vergleich zum Referenzmodell (31 % Unterschied zwischen den Verteilungen) können die Versickerungsanlagen und die Gründächer die Intensitätsspitze des Euler Regens abpuffern.

Bei den Zisternentypen tritt der größte prozentuale Unterschied zwischen den Überflutungsvolumina bei der Zisterne mit 25,6 % auf. Das vergleichsweise geringe Nutzvolumen der Zisterne ist schnell gefüllt, so dass die Intensitätsspitze des Euler Regens weniger abgepuffert werden kann, was zu Überflutungen führt. Im Gegensatz dazu ist der Unterschied bei den Retentionszisternen mit 13,5 % und 14,3 % deutlich geringer. Sie reagieren wenig sensitiv auf die Niederschlagsverteilung und können die Intensitätsspitze abpuffern.

Bei den HOB beträgt der prozentuale Unterschied des Überflutungsvolumens zwischen den Verteilungen 31,3 % und ist sogar noch größer als beim Referenzmodell. Bei den Baumrigolen beträgt der Unterschied 29,9 %. Es muss berücksichtigt werden, dass an die HOB und Baumrigolen nur 25,4 ha bzw. 39,1 ha Straßenfläche angeschlossen sind im Vergleich zu den anderen RWBA, bei denen 97,8 ha Dachfläche bewirtschaftet werden. Dennoch reagieren die modifizierten Straßenbäume unter allen untersuchten RWBA am sensitivsten auf die Niederschlagsverteilungen.

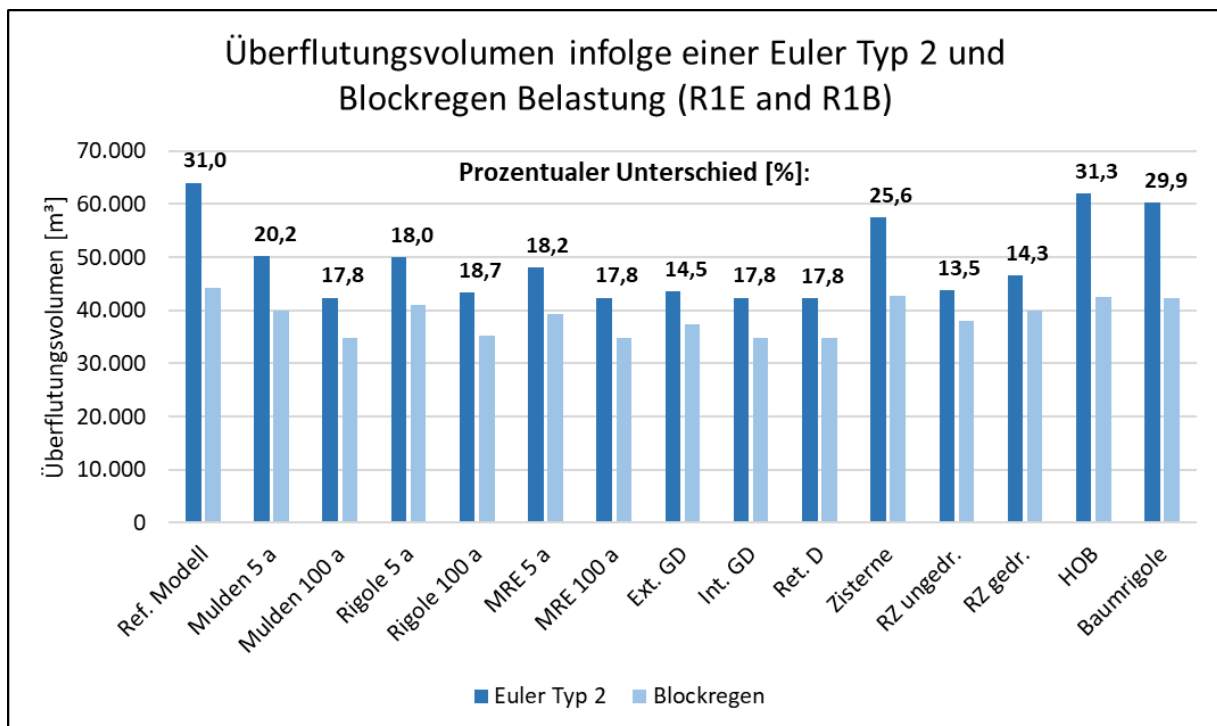


Abbildung 4-8: Prozentualer Unterschied des Überflutungsvolumens zwischen Euler Typ 2 (R1E) und Blockregen (R1B) Niederschlagsbelastung für das Referenzmodell und den verschiedenen RWBA (Implementierungsgrad 100 %)

Diskussion im Zusammenhang mit Literaturergebnissen

In keiner der im Rahmen der Literaturrecherche analysierten Publikationen wird der Einfluss unterschiedlicher Niederschlagsverteilungen auf die Leistungsfähigkeit von RWBA hinsichtlich der Überflutungsminderung untersucht. In den meisten Publikationen werden Modellregen mit verschiedenen Jährlichkeiten, aber identischer Niederschlagsverteilung verwendet.

4.4 Einfluss der Regendauer

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Regendauer auf die Wirkung von RWBA zur Überflutungsminderung untersucht. Dazu ist in Abbildung 4-9 das Überflutungsvolumen infolge von zwei Niederschlagsbelastungen mit unterschiedlicher Dauer für das Referenzmodell und die RWBA bei einem Implementierungsgrad von 100 % dargestellt. Zusätzlich ist der prozentuale Unterschied des Überflutungsvolumens zwischen den Regenereignissen angegeben. Beide Regenereignisse haben eine Jährlichkeit von $T = 100$ a und eine Euler Typ 2 Niederschlagsverteilung. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Dauer und Niederschlagshöhe, die 60 min und 48,9 mm (R1E) sowie 6 h und 74,3 mm (R1E6) betragen.

Die Regendauer und damit zusammenhängend die Niederschlagshöhe haben einen großen Einfluss auf das Überflutungsvolumen: Der prozentuale Unterschied zwischen den Regenereignissen beträgt 39,3 % bis 82,9 %. Der längere Regen R1E6 führt beim Referenzmodell und den RWBA zu deutlich größeren Überflutungsvolumina. Mit zunehmender Regendauer sinkt die Intensität des Regens, allerdings steigt die Niederschlagshöhe. Die RWBA reagieren sensitiv auf die längere Regendauer und größere Regenmenge: Der prozentuale Unterschied des Überflutungsvolumens zwischen den Regenereignissen ist bei allen RWBA höher als beim Referenzmodell.

Bei den Versickerungsanlagen 5 a beträgt der prozentuale Unterschied zwischen den Überflutungsvolumina der Regen 68,3 % - 70,2 %, bei den Versickerungsanlagen 100 a liegt er zwischen 51,5 % und 52,1 %. In Tabelle 4-2 sind beispielhaft für die Mulden 5 a und 100 a die Zuflüsse und Abflüsse infolge beider Regenereignisse zusammengestellt. Aufgrund der längeren Regendauer ist das Verhältnis zwischen Infiltration und Zufluss bei R1E6 mit 55,1 % (Mulden 5 a) und 85,6 % (Mulden 100 a) wesentlich höher als bei R1E mit 12,7 % (Mulden 5 a) und 23 % (Mulden 100 a). Der Einfluss des Infiltrationsprozesses auf das Anlagenverhalten nimmt mit der Versickerungsfläche und der Niederschlagsdauer zu.

Bei den intensiven Grün- und Retentionsdächern ist der prozentuale Unterschied des Überflutungsvolumens identisch und liegt bei 51,5 %. Dies entspricht in etwa dem prozentualen Unterschied der Versickerungsanlagen 100 a. Aufgrund ihrer großen Rückhaltekapazität sind die Grün- und Retentionsdächer robust gegenüber der längeren Niederschlagsdauer. Bei den extensiven Gründächern liegt der prozentuale Unterschied bei 79,1 % und ist damit noch höher als bei den Versickerungsanlagen 5 a. Die Rückhaltewirkung der extensiven Gründächer bricht ein, wenn die Niederschlagshöhe von R1E ($h_N = 48,9$ mm) überschritten wird. Die extensiven Gründächer sind weniger robust gegenüber langanhaltenden Regenfällen, da der Drainageabfluss dem Kanalnetz zugeleitet wird und damit überflutungswirksam wird.

Bei den Zisternen beträgt der prozentuale Unterschied zwischen den Überflutungsvolumina 54,2 % und ist damit nur leicht höher als bei den Versickerungsanlagen 100 a und den intensiven Grün- und Retentionsdächern. Betrachtet man jedoch das absolute

Überflutungsvolumen infolge R1E6, zeigt sich, dass es mit 88.556 m³ nur knapp unter dem Überflutungsvolumen des Referenzmodells von 89.067 m³ liegt. Eine Bewertung des Anlagenverhaltens allein anhand des prozentualen Unterschieds ist hier nicht zielführend, da bereits bei R1E das Überflutungsvolumen sehr groß ist und so die prozentuale Zunahme infolge R1E6 vergleichsweise gering ist. Zisternen sind nicht geeignet, um langanhaltende Niederschläge mit hoher Niederschlagshöhe zurückzuhalten. Bei den ungedrosselten Retentionszisternen ist der prozentuale Unterschied des Überflutungsvolumens zwischen den Regen am größten mit 82,9 %. Sie reagieren am sensitivsten auf die längere Regendauer. Im Gegensatz dazu beträgt der Unterschied bei den gedrosselten Retentionszisternen nur 53,1 %. Das Überflutungsvolumen infolge R1E6 ist mit 71.207 m³ geringer als bei den ungedrosselten Varianten (80.149 m³), obwohl es bei R1E mit 46.518 m³ noch über den ungedrosselten Varianten (43.830 m³) liegt. Die gedrosselten Retentionszisternen sind robuster gegenüber langanhaltenden Niederschlägen mit größerer Niederschlagshöhe, da durch die Drossel der Ablauf dem Kanalnetz kontinuierlich zugeführt wird und so Überlaufintensitätsspitzen bei Vollfüllung vermieden werden. Die längere Regendauer begünstigt diesen Prozess.

Bei den modifizierten Straßenbäumen sind die prozentualen Unterschiede der Überflutungsvolumina mit 42,2 % und 45,9 % von allen RWBA am geringsten, allerdings liegen wie bei den Zisternen die absoluten Überflutungsvolumina nur knapp unter dem des Referenzmodells. Die HOB und Baumrigolen sind für den Rückhalt von langanhaltenden Regen mit größerer Niederschlagshöhe ungeeignet.

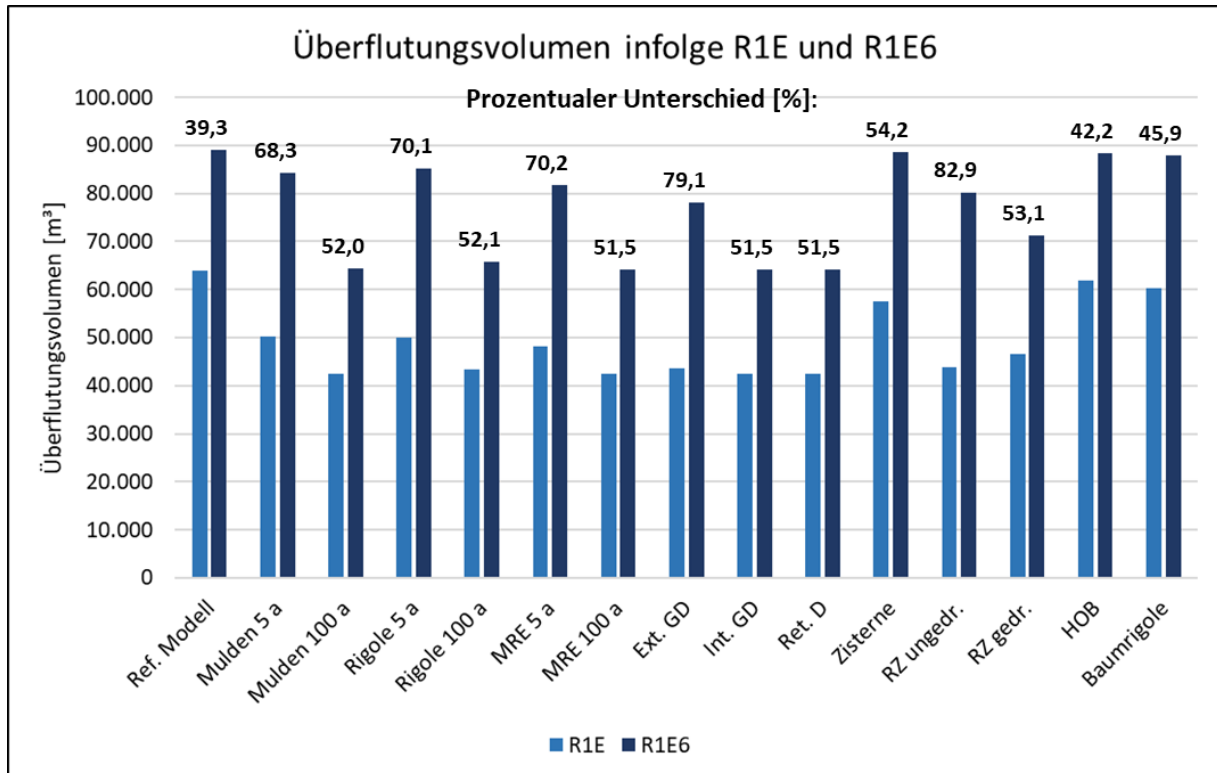


Abbildung 4-9: Prozentualer Unterschied des Überflutungsvolumens zwischen R1E und R1E6 für das Referenzmodell und den verschiedenen RWBA (Implementierungsgrad 100 %)

Tabelle 4-2: Vergleich der Zuflüsse und Abflüsse aus den Mulden für R1E und R1E6

| RWBA | Regen | Zufluss | Infiltration | Infiltrationsanteil am Zufluss | Überlauf | Überlaufanteil am Zufluss |
|-----------------|-------|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------------|
| | | [m ³] | [m ³] | [%] | [m ³] | [%] |
| Mulden 5 a | R1E | 51.005 | 6.478 | 12,7 | 21.947 | 43,0 |
| | R1E6 | 77.458 | 42.698 | 55,1 | 26.053 | 33,6 |
| Mulden 100 a | R1E | 54.451 | 12.541 | 23,0 | 0 | 0 |
| | R1E6 | 82.689 | 71.018 | 85,6 | 477 | 0,006 |

Diskussion im Zusammenhang mit Literaturergebnissen

Die Auswirkungen unterschiedlicher Regendauern von Modellregen wird in den Studien nicht untersucht. Lediglich Bae und Lee (2020), die reale Niederschlagsereignisse als Simulationsinput verwenden, vergleichen gezielt den Effekt von RWBA bei Niederschlagsdauern von 14 h und 30 h. Dabei zeigt sich, dass beim längeren Ereignis der Versickerungsanteil durch Rasengittersteine deutlich größer ist als beim kürzeren Ereignis. Dies stimmt mit den Ergebnissen dieser Arbeit überein, wonach der Einfluss der Infiltration durch Versickerungsanlagen mit zunehmender Niederschlagsdauer steigt.

4.5 Einfluss der räumlichen Verteilung der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen

In den vorherigen Kapiteln wurden alle Ergebnisse unter der Annahme einer homogenen Verteilung der RWBA im Untersuchungsgebiet simuliert (Erläuterung in Kapitel 3.6.2). Im Folgenden werden die Auswirkungen einer heterogenen Verteilung von Retentionsdächern auf das Überflutungsgeschehen untersucht und mit den Ergebnissen bei einer homogenen Verteilung verglichen.

In Abbildung 4-10 (c) ist rot umkreist der Überflutungsschwerpunkt des Untersuchungsgebiets markiert. Weitläufig um den Überflutungsschwerpunkt ist der Implementierungsbereich gezogen, innerhalb dessen sich 50,3 % der Dachfläche befinden. Als Beispiel für eine heterogene Verteilung von RWBA werden die Dachflächen innerhalb des Implementierungsbereichs als Retentionsdächer modelliert, die Dachflächen außerhalb als normale Dächer. Zum Vergleich werden die Dächer im Gesamtgebiet bei einer homogenen Verteilung als Retentionsdächer mit einem Implementierungsgrad von 50,3 % modelliert.

Abbildung 4-10 zeigt die maximalen Wasserstände im Überflutungsschwerpunkt infolge R1E unter der Berücksichtigung von Retentionsdächern mit einem Implementierungsgrad von 50,3 % für die homogene (a) und die heterogene (b) Verteilung. Bei der

heterogenen Verteilung ist die überflutete Fläche im Vergleich zur homogenen Verteilung kleiner und die maximalen Wasserstände sind deutlich geringer. Die schwarzen Pfeile markieren den tiefsten Punkt im Straßenraum. Dort beträgt der maximale Wasserstand bei der homogenen Verteilung 45 cm und bei der heterogenen Verteilung nur 31 cm. Das Überflutungsvolumen im Gesamtgebiet unterscheidet sich hingegen nur geringfügig: Es beträgt 49.411 m³ bei homogener und 48.983 m³ bei heterogener Verteilung. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die räumliche Verteilung von RWBA einen großen Einfluss auf das Überflutungsgeschehen hat. Für eine maximale Überflutungsreduktion sollten die Anlagen gezielt um den Überflutungsschwerpunkt angeordnet werden.

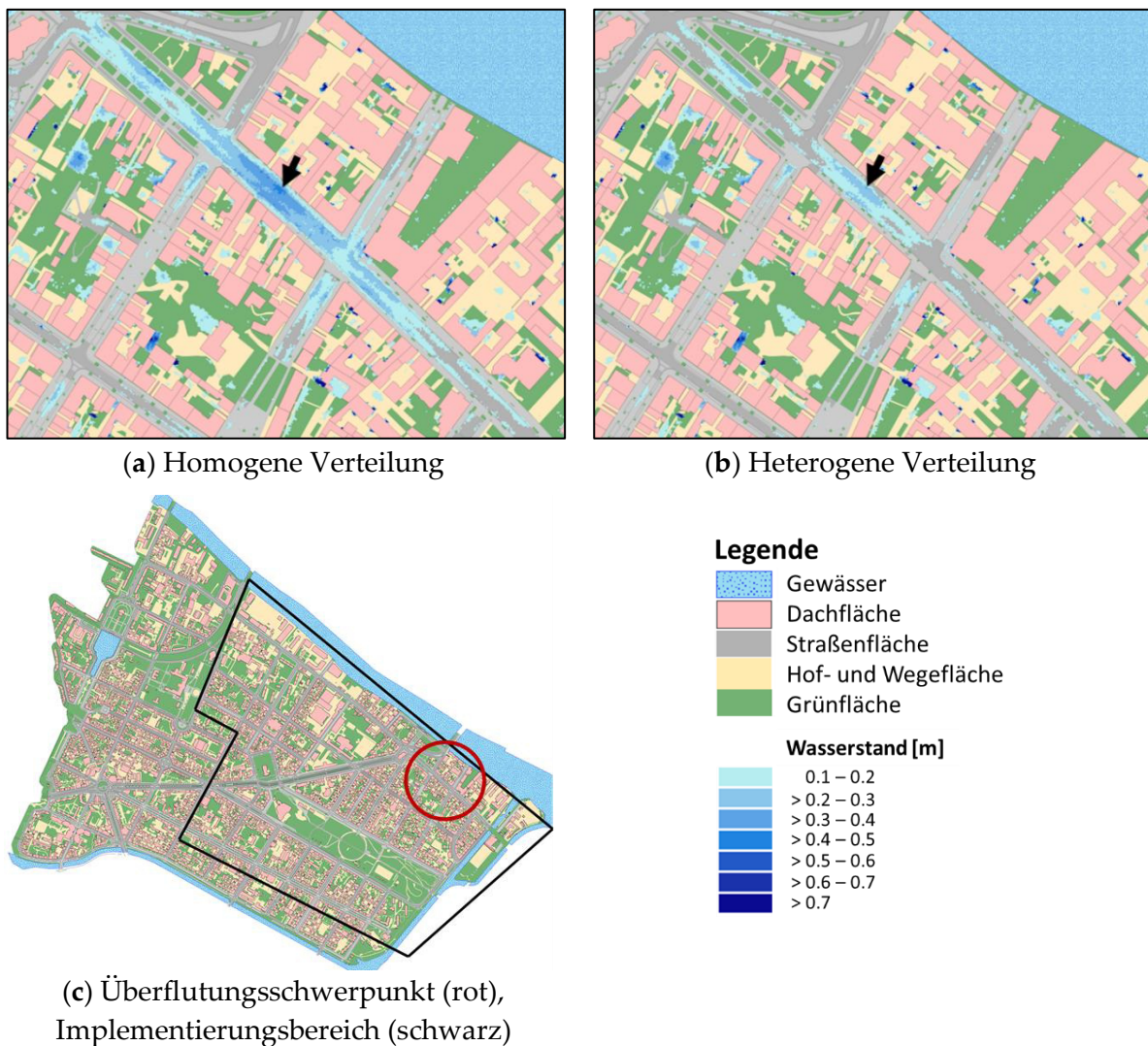


Abbildung 4-10: Maximale Wasserstände im Überflutungsschwerpunkt infolge R1E bei Retentionsdächern mit einem Implementierungsgrad von 50,3 %. Die schwarzen Pfeile markieren den tiefsten Punkt im Straßenraum

Analog zum vorherigen Abschnitt sind in Abbildung 4-11 die maximalen Wasserstände infolge R1E unter der Berücksichtigung von einer homogenen (a) und heterogenen (b) Verteilung von Retentionsdächern dargestellt. Allerdings sind die Retentionsdächer bei der heterogenen Verteilung diesmal möglichst weit entfernt vom Überflutungsschwerpunkt angeordnet. Im Implementierungsbereich (c) befinden sich 49,7 % der Dachflächen, die als Retentionsdächer modelliert werden. Die Dachflächen außerhalb des Bereichs werden als normale Dächer abgebildet. Zum Vergleich werden die Dächer im Gesamtgebiet bei einer homogenen Verteilung als Retentionsdächer mit einem Implementierungsgrad von 49,7 % modelliert.

Bei der homogenen Verteilung ist die überflutete Fläche kleiner, und die maximalen Wasserstände sind im Vergleich zur heterogenen Verteilung deutlich geringer. Der maximale Wasserstand im Straßenraum (schwarzer Pfeil) beträgt bei der homogenen Verteilung 46 cm, bei der heterogenen Verteilung 55 cm. Das Überflutungsvolumen im Gesamtgebiet beträgt 49.564 m³ (homogene Verteilung) und 54.450 m³ (heterogene Verteilung). Wenn die RWBA weit entfernt vom Überflutungsschwerpunkt angeordnet werden, verstärkt sich dort die Überflutung im Vergleich zu einer gleichmäßigen Verteilung der Anlagen im Untersuchungsgebiet. Die Ergebnisse bestätigen die vorherige Untersuchung, in der eine Anordnung der RWBA um den Überflutungsschwerpunkt untersucht wurde.

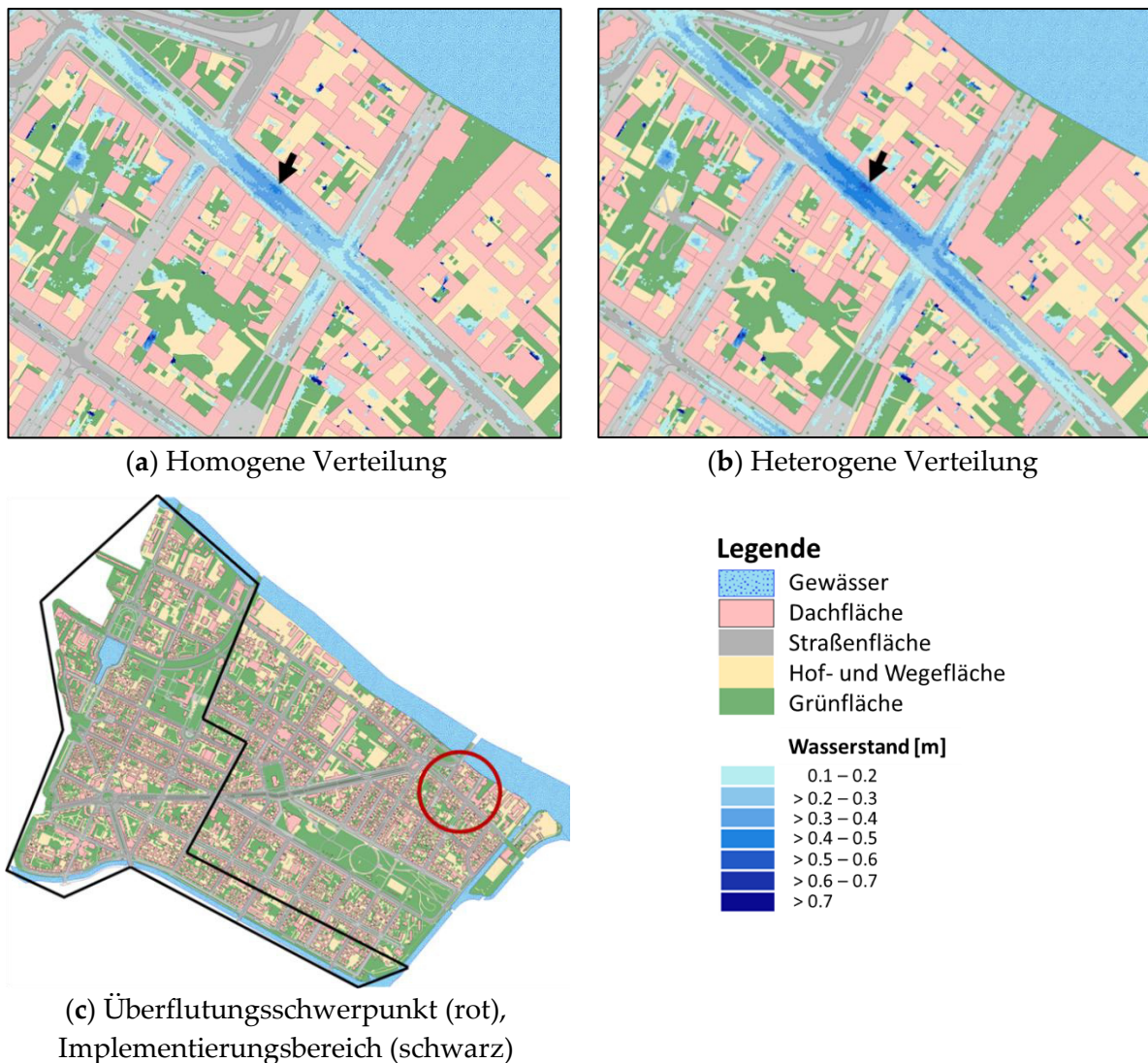


Abbildung 4-11: Maximale Wasserstände im Überflutungsschwerpunkt infolge R1E bei Retentionsdächern mit einem Implementierungsgrad von 49,7 %. Die schwarzen Pfeile markieren den tiefsten Punkt im Straßenraum

Diskussion im Zusammenhang mit Literaturergebnissen

Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen die Ergebnisse von Hamers et al. (2023) und Costa et al. (2021) die auf regionaler und städtischer Ebene zeigen, dass RWBA eine größere Wirkung auf die Überflutungsminderung haben, wenn sie in überflutunggefährdeten Bereichen platziert werden. Zudem ist es in Entwässerungssystemen sinnvoll, oberhalb gelegene Teileinzugsgebiete durch RWBA abzukoppeln, um die Beanspruchung des nachfolgenden Systems zu verringern (Haghighatafshar et al. 2018 und Almaaitah et al. 2021).

5 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Einzugsgebiete

Die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Ergebnisse basieren auf den Simulationen innerhalb des Untersuchungsgebiets. Es stellt sich die Frage, inwieweit sich der Effekt zur Überflutungsminderung der RWBA auf andere Einzugsgebiete (EZG) übertragen lässt. In diesem Kapitel wird zunächst die Erstellung und Anwendung von Wirkungskurven beschrieben, anhand derer sich überflutungsmindernde Wirkung der Anlagen auf andere EZG übertragen lässt. Die Qualität der Übertragung wird anhand detaillierter Simulationsergebnisse zweier Validierungsgebiete bewertet (siehe Kapitel 3.1).

5.1 Erstellung und Anwendung von Wirkungskurven

Die Wirkungskurven basieren auf Auswertungen, in denen für jede Anlage die Reduktion des Überflutungsvolumens in Abhängigkeit vom Implementierungsgrad ermittelt wurde (siehe Kapitel 4.2). Abbildung 5-1 veranschaulicht exemplarisch die Erstellung der Wirkungskurve für intensive Gründächer. Das obere Diagramm zeigt das Überflutungsvolumen für das Referenzmodell und der intensiven Gründächer in Abhängigkeit des Implementierungsgrades. Im Diagramm ist zusätzlich die prozentuale Reduktion des Überflutungsvolumens je Implementierungsstufe dargestellt. Diese Werte sind im unteren Diagramm auf der y-Achse aufgetragen. Auf der oberen x-Achse ist weiterhin der Implementierungsgrad aufgetragen. Dieser kann auch als Bewirtschaftungsanteil dargestellt werden:

$$\frac{98 \text{ ha Dachfläche}}{340 \text{ ha Gesamtgebietsfläche}} = 28,8 \% \text{ Bewirtschaftungsanteil}$$

Das Ergebnis ist eine Wirkungskurve, die die prozentuale Reduzierung des Überflutungsvolumens in Abhängigkeit von der bewirtschafteten Fläche im Verhältnis zur Gesamtgebietsfläche zeigt. Nach dem gleichen Vorgehen werden Wirkungskurven für Versickerungsanlagen, Gründächer und Zisternentypen erstellt – jeweils für die Niederschlagsbelastungen R1E und R2E.

Die Wirkungskurve dient dazu, den überflutungsmindernden Effekt intensiver Gründächer für ein neues, fiktives EZG abzuschätzen. Für das neue EZG müssen sowohl die Gesamtgebietsgröße als auch das Potenzial zur Umsetzung intensiver Gründächer bekannt sein. Beispielsweise beträgt die Gesamtgebietsgröße 220 ha, die zu intensiven Gründächern umrüstbare Dachfläche 30 ha. Daraus ergibt sich ein Bewirtschaftungsanteil von 13,6 %, anhand dessen die Reduzierung des Überflutungsvolumens für das neue EZG mithilfe der Wirkungskurve für Zwischenwerte abgelesen werden kann

(siehe rote Pfeile in Abbildung 5-1). Für das neue EZG ergibt sich eine geschätzte Überflutungsminderung durch intensive Gründächer von 21 %.

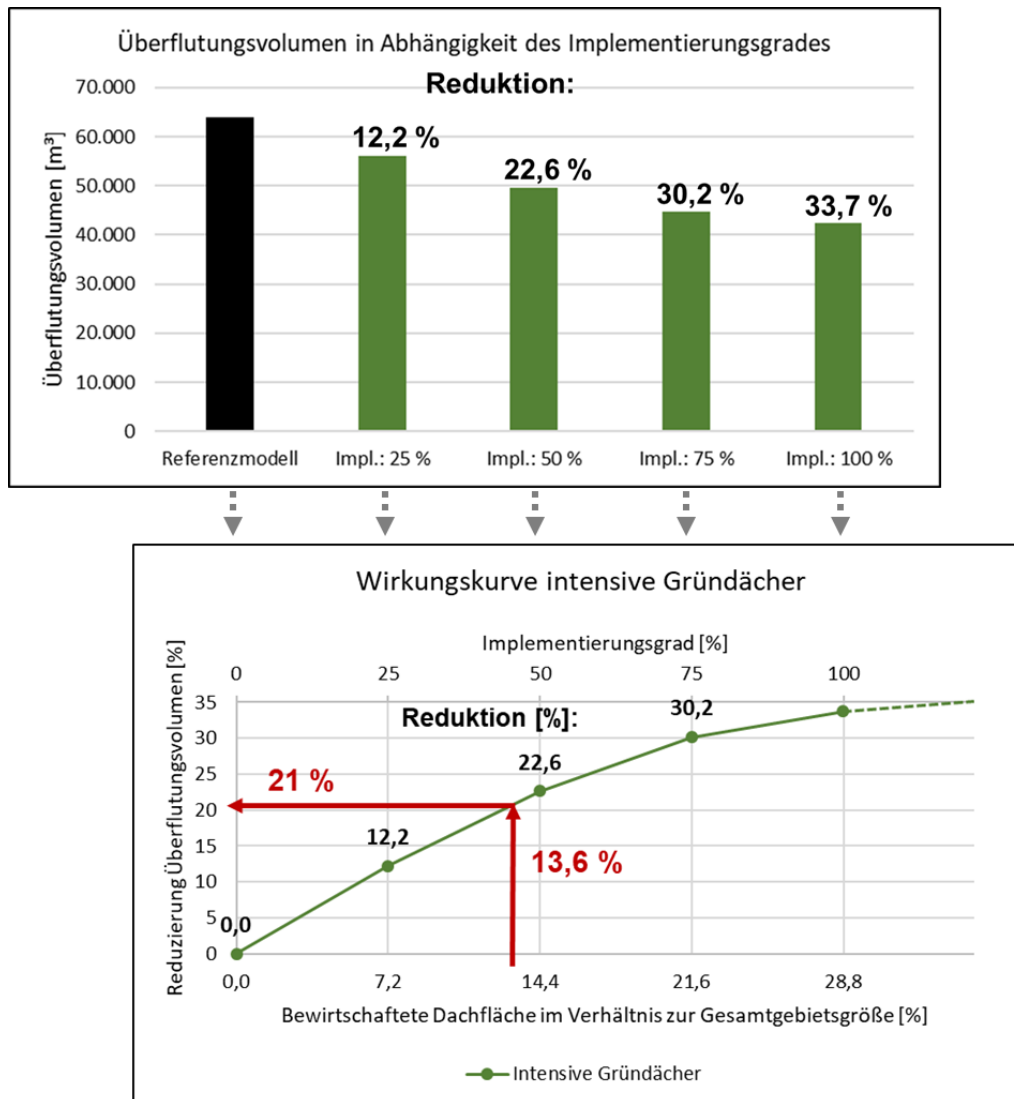


Abbildung 5-1: Erstellung und Anwendung der Wirkungskurve

5.2 Übertragbarkeit der Wirkungskurven

Mit der vorgestellten Methodik kann der Effekt von RWBA auf die Überflutungsminde- rung in urbanen EZG abgeschätzt werden. Die Genauigkeit dieser Abschätzung muss validiert werden, da die gebietsspezifischen Eigenschaften des neuen EZG bei der Übertragung der Ergebnisse nicht berücksichtigt werden. Dazu zählen Informati- onen über die Topografie, die Verteilung der befestigten Flächen, den Grünflächenan- teil, die Bodenart und das Verhalten des Kanalnetzes.

Zur Validierung der Wirkungskurven werden in zwei Validierungsgebieten detaillierte Simulationen durchgeführt und – analog zum Untersuchungsgebiet – entsprechende Wirkungskurven erstellt. Anschließend werden die Wirkungskurven miteinander verglichen. Stimmen die Kurven überein, kann die Überflutungsminderung in den Validierungsgebieten mithilfe der Wirkungskurve aus dem Untersuchungsgebiet zuverlässig bestimmt werden. Die Eigenschaften der Validierungsgebiete sind in Kapitel 3.1 beschrieben. Die Validierungsgebiete liegen in unmittelbarer Nähe zum Untersuchungsgebiet, haben ähnliche topografische Verhältnisse und weisen die gleiche Bodenart auf. Diese Kriterien wurden gezielt bei der Auswahl der Validierungsgebiete berücksichtigt, um gebietspezifische Unterschiede zu minimieren.

5.2.1 Vergleich Wirkungskurven

Abbildung 5-2 zeigt die Wirkungskurven der Mulden 5 a, der Mulden 100 a und der Retentionsdächer für die drei Modellgebiete unter der Niederschlagsbelastung R1E. Diese drei Anlagen repräsentieren das Spektrum der Leistungsfähigkeit von geringer bis hoher Überflutungsminderung und sind somit stellvertretend für andere RWBA. Für alle drei Anlagen liegt die Wirkungskurve des Untersuchungsgebiets (blau) zwischen jener des Validierungsgebiets 1 (orange) und des Validierungsgebiets 2 (schwarz). Das bedeutet, dass die Überflutungsminderung bei Anwendung der Wirkungskurve aus dem Untersuchungsgebiet im Validierungsgebiet 1 überschätzt und im Validierungsgebiet 2 unterschätzt wird. In Tabelle 5-1 sind die Abweichungen zwischen den Wirkungskurven bei einem Bewirtschaftungsanteil von 23 % (maximaler Bewirtschaftungsanteil von Validierungsgebiet 1) dargestellt. Für R1E liegt die Abweichung der prozentualen Reduktion von Validierungsgebiet 1 im Vergleich zum Untersuchungsgebiet bei - 33,7 % und - 25,9 % und bei Validierungsgebiet 2 bei 16,6 % und 6,8 %. Somit passen die Wirkungskurven des Untersuchungsgebiets eher zu den Kurven des Validierungsgebiet 2, wobei dieser Zusammenhang bei den Mulden 100 a sowie den Retentionsdächern noch ausgeprägter ist. Die Wirkungskurven der Mulden 100 a und der Retentionsdächer sind für R1E identisch, da beide Anlagen das gesamte Niederschlagsereignis zurückhalten können.

Zwischen den Wirkungskurven des Untersuchungsgebiets und des Validierungsgebiets 1 besteht eine unzureichende Übereinstimmung. Hingegen zeigt sich zwischen den Wirkungskurven des Untersuchungsgebiets und des Validierungsgebiets 2 eine moderate bis gute Übereinstimmung, die bei leistungsfähigeren Anlagen noch ausgeprägter ist. Dies liegt an der unterschiedlichen Anfälligkeit der Modellgebiete für Überflutungen. Tabelle 5-2 zeigt das Überflutungsvolumen im Referenzmodell für jedes Modellgebiet in Abhängigkeit von der Gebietsfläche unter der Niederschlagsbelastung R1E. Im Untersuchungsgebiet beträgt das Überflutungsvolumen 188,3 m³/ha und ist damit vergleichbar mit dem des Validierungsgebiets 2 (172,5 m³/ha). Im Validierungsgebiet 1 ist das Überflutungsvolumen mit 400,7 m³/ha mehr als doppelt so

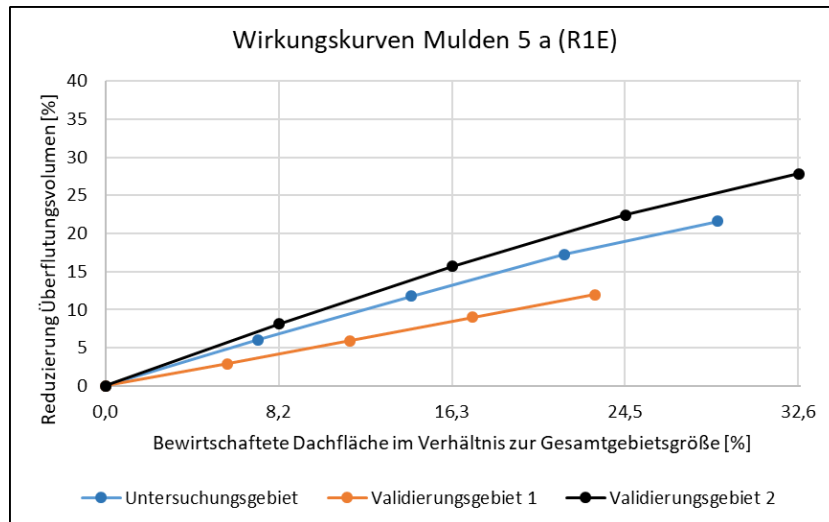
hoch. Das Validierungsgebiet 1 weist somit eine deutlich höhere Überflutungsgefährdung auf, was zu einem geringeren prozentualen Effekt der RWBA bei gleichem Bewirtschaftungsanteil führt: Wenn in einem Teilbereich des Untersuchungsgebiets im Referenzmodell ein Wasserstand von 0,5 m simuliert wird, der durch RWBA um 0,25 m verringert werden kann, ist das eine Reduzierung von 50 %. Wird hingegen bei Validierungsgebiet 1 im Referenzmodell aufgrund der höheren Überflutungsanfälligkeit ein Wasserstand von 1 m simuliert, der bei gleichem Bewirtschaftungsanteil der RWBA ebenfalls um 0,25 m verringert wird, beträgt die Reduzierung nur 25 %. Die Übereinstimmung der Wirkungskurven hängt somit wesentlich von einer ähnlichen Überflutungsanfälligkeit der Gebiete ab.

Tabelle 5-1: Vergleich der Wirkungskurven bei einem Bewirtschaftungsanteil von 23 %

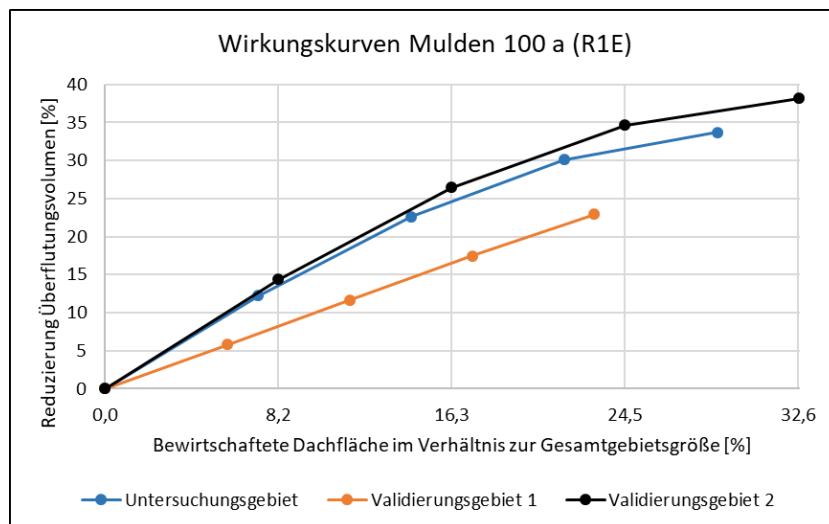
| RWBA/Modellgebiet | R1E | | R2E | |
|-------------------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | Reduktion [%] | Abweichung [%] | Reduktion [%] | Abweichung [%] |
| Mulden 5 a | | | | |
| Untersuchungsgebiet | 18,1 | | 3,6 | |
| Validierungsgebiet 1 | 12 | - 33,7 | 2,9 | - 19,4 |
| Validierungsgebiet 2 | 21,1 | + 16,6 | 5,8 | + 61,1 |
| Mulden 100 a | | | | |
| Untersuchungsgebiet | 30,9 | | 12,1 | |
| Validierungsgebiet 1 | 22,9 | - 25,9 | 7,4 | - 38,8 |
| Validierungsgebiet 2 | 33,0 | + 6,8 | 15,4 | + 27,3 |
| Retentionsdächer | | | | |
| Untersuchungsgebiet | 30,9 | | 28,0 | |
| Validierungsgebiet 1 | 22,9 | - 25,9 | 15,9 | - 43,2 |
| Validierungsgebiet 2 | 33,0 | + 6,8 | 30,1 | + 7,5 |

Tabelle 5-2: Überflutungsvolumen je Hektar Gebietsfläche im Referenzmodell für die Niederschlagsbelastungen R1E und R2E

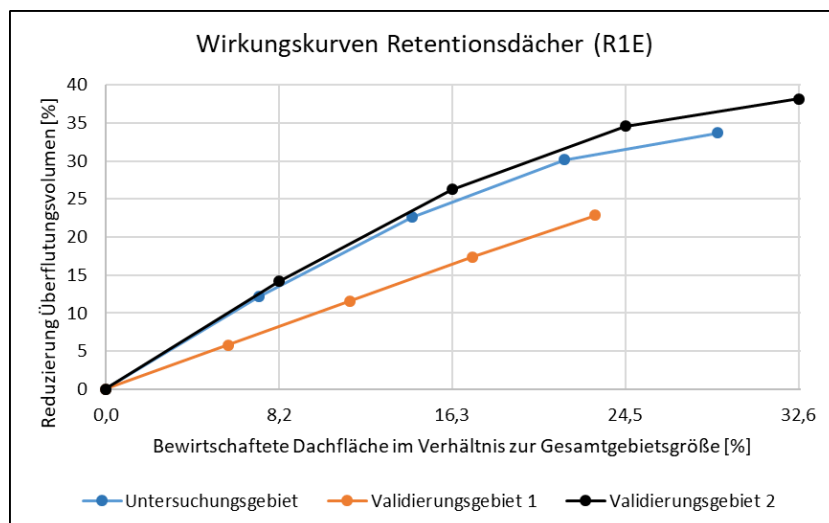
| Modellgebiet | R1E | R2E |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| | [m ³ /ha] | [m ³ /ha] |
| Untersuchungsgebiet | 188,3 | 570,7 |
| Validierungsgebiet 1 | 400,7 | 1056,7 |
| Validierungsgebiet 2 | 172,5 | 596,7 |



(a) Mulden 5 a



(b) Mulden 100 a

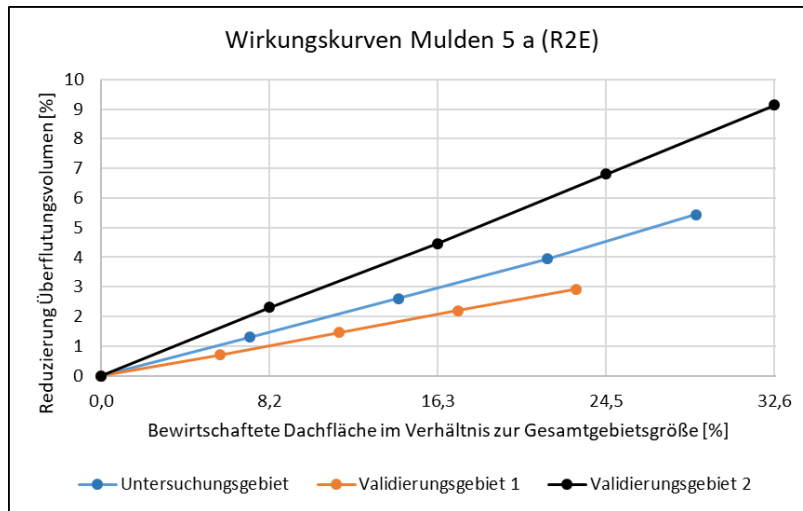


(c) Retentionsdächer

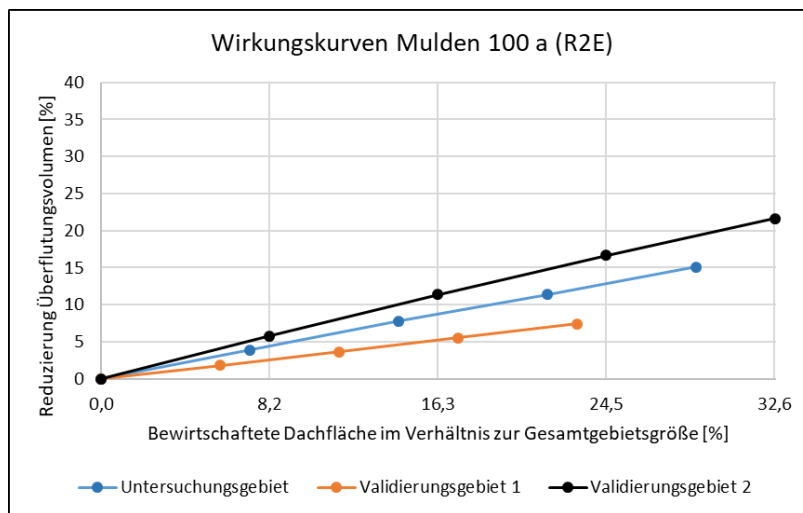
Abbildung 5-2: Vergleich der Wirkungskurven zwischen den Modellgebieten R1E

Abbildung 5-3 zeigt die Wirkungskurven der Mulden 5 a, der Mulden 100 a und der Retentionsdächer für die drei Modellgebiete unter der intensiveren Niederschlagsbelastung R2E. Wie bei R1E liegen die Wirkungskurven des Untersuchungsgebiets bei den drei Anlagen zwischen den Kurven der Validierungsgebiete. In Tabelle 5-1 sind die Abweichungen bei einem Bewirtschaftungsanteil von 23 % dargestellt. Die Wirkungskurve der Mulden 5 a des Untersuchungsgebiets stimmt besser mit der Kurve von Validierungsgebiet 1 überein (Abweichung nur - 19,4 % im Vergleich zu Validierungsgebiet 2 mit 61,1 %). Allerdings unterscheiden sich die Überflutungsvolumen pro Flächeneinheit (Tabelle 5-2) zwischen den beiden Gebieten deutlich: 570,7 m³/ha im Untersuchungsgebiet gegenüber 1056,7 m³/ha im Validierungsgebiet 1. Erst ab den Mulden 100 a zeigt sich der Trend, dass die die Kurven des Untersuchungsgebiets und des Validierungsgebiets 2 besser übereinstimmen (Abweichung bei 27,3 % und 7,5 % im Vergleich zu Validierungsgebiet 1 mit Abweichungen von - 38,8 % und - 43,2 %).

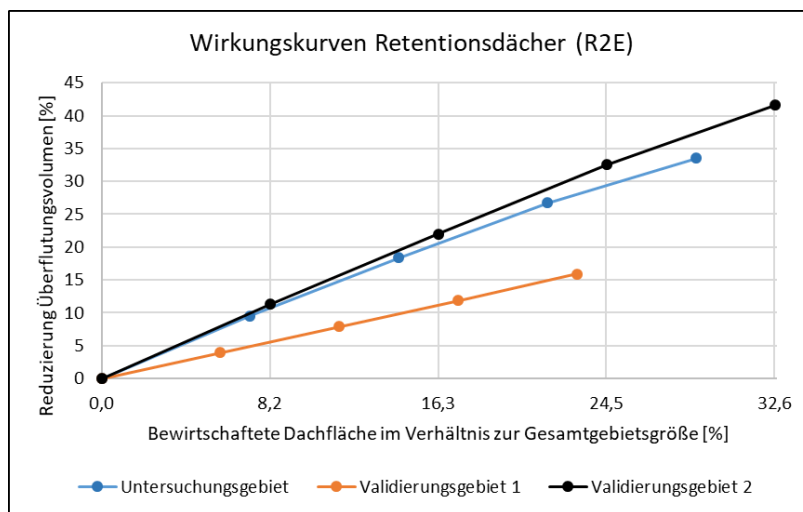
Die Wirkungskurven der Mulden 5 a und 100 a zeigen eine unzureichende Übereinstimmung. Nur bei den Retentionsdächern weisen die Wirkungskurven des Untersuchungsgebiets und des Validierungsgebiets 2 eine gute Übereinstimmung auf. Der Vergleich der Wirkungskurven der Mulden 5 a zeigt, dass eine ähnliche Überflutungsanfälligkeit – ausgedrückt durch das Überflutungsvolumen pro Flächeneinheit – nicht der alleinige Faktor für die Übereinstimmung der Wirkungskurven ist.



(a) Mulden 5 a



(b) Mulden 100 a



(c) Retentionsdächer

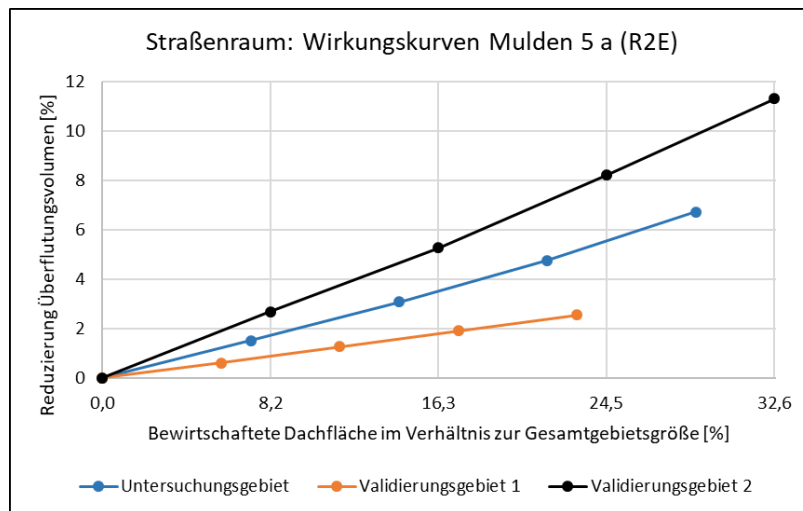
Abbildung 5-3: Vergleich der Wirkungskurven zwischen den Modellgebieten infolge R2E

Zwischenfazit

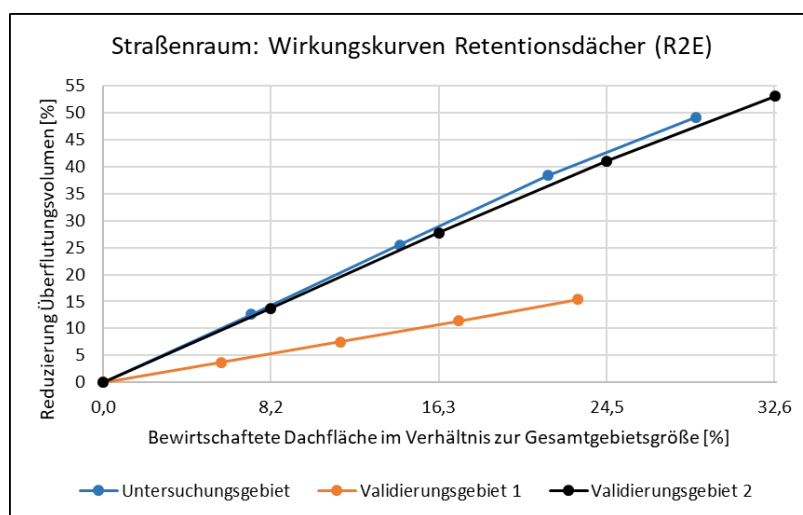
Der Vergleich der Wirkungskurven der Mulden 5 a, Mulden 100 a und Retentionsdächer für die drei Modellgebiete unter den Niederschlagsbelastungen R1E und R2E ergibt ein uneinheitliches Bild: Während die Wirkungskurven des Untersuchungsgebiets und des Validierungsgebiets 2 größtenteils gut übereinstimmen, zeigt sich zwischen dem Untersuchungsgebiet und dem Validierungsgebiet 1 eine deutlich größere Diskrepanz. Ein entscheidender Einflussfaktor ist die unterschiedliche Überflutungsanfälligkeit der Modellgebiete, die sich durch das Überflutungsvolumen pro Flächeneinheit beschreiben lässt. Allerdings erfordert dies eine detaillierte Überflutungssimulation, was der Zielsetzung widerspricht, mit den Wirkungskurven erste Abschätzungen ohne aufwendige Modellierungen zu ermöglichen.

5.2.2 Vergleich modifizierter Wirkungskurven

In einem weiteren Ansatz wird untersucht, ob eine bessere Übereinstimmung der Wirkungskurven erzielt wird, wenn statt der Reduzierung des Überflutungsvolumens im gesamten Gebiet nur die Reduzierung im Straßenraum betrachtet wird. Der Hintergrund dieses Ansatzes ist, dass die Überflutungsminderung durch die RWBA primär im Straßenraum erfolgt, da sich dort die Schächte und Straßenabläufe befinden, die über das Kanalnetz die Verbindung zwischen den RWBA und der Oberfläche herstellen. Überflutungen im Bereich von Grünflächen können durch die RBWA nicht reduziert werden und bleiben bei dieser Betrachtung unberücksichtigt. Abbildung 5-4 zeigt exemplarisch die Wirkungskurven der Mulden 5 a und der Retentionsdächer für die Modellgebiete infolge von R2E, basierend auf der Auswertung im Straßenraum. Bei den Mulden 5 a liegt die Wirkungskurve des Untersuchungsgebiets zwischen denen der Validierungsgebiete. Im Gegensatz dazu zeigen die Wirkungskurven der Retentionsdächer eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Untersuchungsgebiet und Validierungsgebiet 2, während die Übereinstimmung zwischen dem Untersuchungsgebiet und Validierungsgebiet 1 ungenügend ausfällt. Zusammenfassend führt die Betrachtung des Straßenraums zu keiner besseren Übereinstimmung der Wirkungskurven, sodass dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wird. Alle zugehörigen Diagramme sind in Anhang A12 und Anhang A13 analog zum vorherigen Kapitel dargestellt.



(a) Mulden 5 a



(b) Retentionsdächer

Abbildung 5-4: Auswertung Straßenraum: Vergleich der Wirkungskurven zwischen den Modellgebieten infolge R2E

5.2.3 Gemittelte Wirkungskurve

Der Vergleich der Wirkungskurven zeigt kein eindeutiges Bild. Eine exakte Übertragung des überflutungsmindernden Effekts mithilfe der Wirkungskurve des Untersuchungsgebiets auf andere EZG ist nicht möglich. Um dennoch eine grobe Abschätzung der Überflutungsreduzierung für andere EZG zu ermöglichen, werden die Wirkungskurven der drei Modellgebiete je RWBA gemittelt und zu einer gemeinsamen Wirkungskurve zusammengefasst. In Abbildung 5-5 ist beispielhaft die gemittelte Wirkungskurve der Mulden 5 a infolge R1E dargestellt. Die gemittelten Wirkungskurven werden für eine einfachere Anwendung in ein Excel-Tool implementiert (siehe Anhang A14).

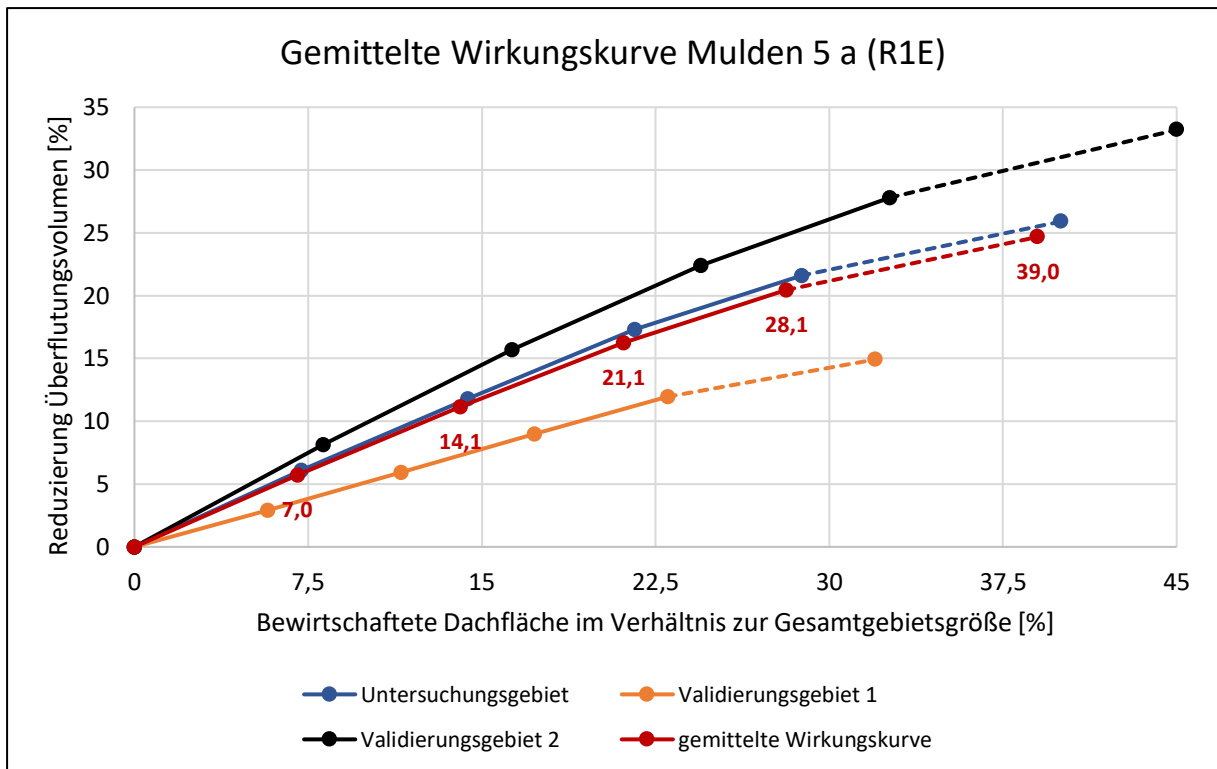


Abbildung 5-5: Gemittelte Wirkungskurve (rot) für Mulden 5 a infolge R1E. Die gestrichelten Teilsegmente basieren auf einer Extrapolation der Ergebnisse

Alternativ können die Wirkungskurven der jeweiligen Modellgebiete beibehalten und in Abhängigkeit von den Eigenschaften des neuen EZG angewendet werden: Ist bekannt, dass das neue EZG überflutungsanfällig ist, können die Wirkungskurven von Validierungsgebiet 1 herangezogen werden; bei einem weniger überflutungsanfälligen Gebiet entsprechend die von Validierungsgebiet 2. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Überflutungsanfälligkeit des neuen EZG bereits bekannt ist, was entweder eine Starkregengefährdungsanalyse oder Erfahrungen aus realen Starkregeneignissen erfordert.

5.3 Fazit

Die Validierung der Wirkungskurven des Untersuchungsgebiets hat eine inkonsistente Übertragung des überflutungsmindernden Effekts von RWBA auf die Validierungsgebiete gezeigt, obwohl die Validierungsgebiete eine ähnliche Topografie und die gleiche Bodenart wie das Untersuchungsgebiet aufweisen. Allerdings unterscheiden sich weitere Gebietseigenschaften wie die Verteilung der befestigten Flächen, der Grünflächenanteil, das Verhalten des Kanalnetzes und damit die Überflutungsanfälligkeit zu stark. Dies bestätigt die Ergebnisse der Literaturrecherche, wonach sich die Überflutungsreduktion durch RWBA aufgrund der Heterogenität der Modellgebiete nicht verallgemeinert und auf andere Gebiete übertragen lässt. Die Wirkungskurven

des Untersuchungsgebiets können nicht zur allgemeinen Quantifizierung des überflutungsmindernden Effekts durch RWBA für andere EZG herangezogen werden.

Um dennoch eine Aussage über den überflutungsmindernden Effekt für andere EZG machen zu können, werden die Wirkungskurven der 3 Modellgebiete je Anlage zu einer Wirkungskurve zusammengefasst und in das Excel-Tool implementiert. Diese gemittelten Wirkungskurven erlauben eine Einschätzung der Größenordnung des Effekts für andere EZG. Zusätzlich ist der überflutungsmindernde Effekt verschiedener RWBA im relativen Vergleich zueinander gebietsunabhängig gültig: Mit der Anwendung der Wirkungskurven über das Excel-Tool kann eine erste Vorauswahl und Priorisierung von RWBA zur Starkregenvorsorge erfolgen. Dabei wird die unterschiedliche Flächenverfügbarkeit für die Umsetzung der Anlagen berücksichtigt und kann vom Nutzer angepasst werden. Die Anwendung der Wirkungskurven kann auf konzeptioneller und planerischer Ebene Entscheidungsträger dabei unterstützen, die Regenwasserbewirtschaftung als Maßnahme des Überflutungsschutzes mit einzubeziehen.

6 Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurde der Effekt verschiedener dezentraler Regenwasserbewirtschaftungsanlagen (RWBA) zur Überflutungsminderung bei außergewöhnlichen und extremen Starkregenereignissen modelltechnisch untersucht. Dazu wurde für ein städtisches Untersuchungsgebiet ein gekoppeltes 1D/2D-Simulationsmodell aufgebaut, in das verschiedene Versickerungsanlagen, Gründächer, Zisternentypen und modifizierte Straßenbäume mit den SWMM-LID-Ansätzen integriert wurden. Durch den Vergleich des Überflutungsgeschehens mit und ohne Berücksichtigung der RWBA konnte die Überflutungsreduktion quantifiziert werden. Mit der Auswertung der Ergebnisse wurde das übergeordnete Forschungsziel (Kapitel 1.2) umfänglich erreicht, die Leistungsfähigkeit verschiedener RWBA bei außergewöhnlichen und extremen Starkregenereignissen im Quervergleich zu bewerten. Die spezifischen Forschungsziele 1 - 5 (Teilaspekte des übergeordneten Forschungsziels) wurden mit einer Ausnahme umfänglich erreicht: Es wurde der überflutungsmindernde Effekt von Versickerungsanlagen (1. Forschungsziel) sowie von Gründächern, Zisternenarten und modifizierten Straßenbäumen (2. Forschungsziel) bei unterschiedlichen Implementierungsgraden quantifiziert. Außerdem wurden der Einfluss der Niederschlagsverteilung und Regendauer auf den überflutungsmindernden Effekt der verschiedenen RWBA untersucht (3. Forschungsziel). Darüber hinaus wurde analysiert, wie sich die räumliche Verteilung der Anlagen auf die Überflutungsminderung auswirkt (4. Forschungsziel). Lediglich das 5. Forschungsziel, das die Übertragbarkeit des überflutungsmindernden Effekts der RWBA auf andere Einzugsgebiete betrachtet, konnte nicht vollständig erfüllt werden.

Aus den fallspezifischen Ergebnissen lassen sich folgende allgemeine Schlussfolgerungen ziehen.

6.1 Vergleichende Bewertung des überflutungsmindernden Effekts der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen

Die auf $T = 5$ a dimensionierten Versickerungsanlagen können auch bei einem 100-jährlichen Ereignis das Überflutungsvolumen deutlich reduzieren (siehe Kapitel 4.1). Mit zunehmender Niederschlagsintensität nimmt der Einfluss der Anlagen ab, allerdings erzielen die auf $T = 100$ a dimensionierten Versickerungsanlagen selbst bei extremen Regenereignissen noch eine große Überflutungsreduzierung. Für die Anforderung eines hohen Überflutungsschutzes ist die Erweiterung von Versickerungsanlagen über das übliche Bemessungsniveau sinnvoll. Dabei ist jedoch der erhöhte Platzbedarf zu berücksichtigen: Im Vergleich zu den auf $T = 5$ a bemessenen Versickerungslagen benötigen die auf $T = 100$ a dimensionierten Anlagen etwa die doppelte Fläche. Bei ge-

ringer Flächenverfügbarkeit empfiehlt sich der Einsatz von Rigolen und Mulden-Rigolen-Elementen, da sie einen geringeren Flächenbedarf als Versickerungsmulden haben und zusätzlich noch einen größeren Effekt zur Überflutungsminderung erzielen.

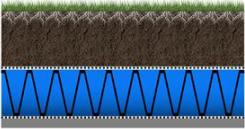

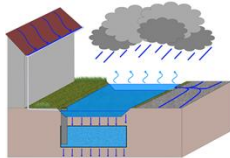
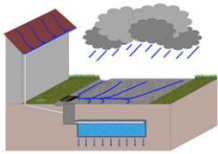
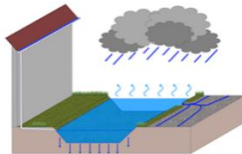


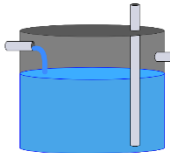



Insgesamt haben das intensive Gründach und das Retentionsdach von allen untersuchten Anlagen den größten Effekt zur Überflutungsminderung und können selbst das 100 mm Niederschlagsereignis zurückhalten. Für einen maximalen Überflutungsschutz sollten diese Anlagen eingesetzt werden. Die Leistung des extensiven Gründachs liegt leicht unter der der auf T = 100 a bemessenen Mulde. Es muss darauf hingewiesen werden, dass in dieser Arbeit die Wirksamkeit der Anlagen zur Überflutungsminderung nur ereignisbasiert untersucht wird. Allerdings hängt die Leistungsfähigkeit von Gründächern maßgeblich vom Wassergehalt der Boden- und Retentionsschicht (sofern vorhanden) ab, der wiederum von vorherigen Niederschlagsereignissen und der Evapotranspiration beeinflusst wird. Beide Faktoren werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Es ist anzunehmen, dass bei vorgesättigten Verhältnissen die Retentionsleistung von Gründächern deutlich zurückgeht.

Die Zisternen sind in ihrer Leistungsfähigkeit leicht unter den auf T = 5 a bemessenen Mulden. Wenn sie gezielt als Rückhalteraum genutzt werden sollen, muss eine Entleerung bei Warnung vor Starkregen automatisiert erfolgen. Die Retentionszisternen liegen in ihrer Leistungsfähigkeit leicht unter den auf T = 100 a dimensionierten Mulden. Mit zunehmender Niederschlagsdauer und -summe erhöht sich der überflutungsmindernde Effekt der gedrosselten Retentionszisterne gegenüber der ungedrosselten Variante, da durch den kontinuierlichen Drosselabfluss die Überlaufabflussspitze reduziert wird.

Baumrigolen und hydrologisch optimierte Baumstandorte haben von allen Anlagen den geringsten Effekt zur Überflutungsminderung und sind selbst bei hohen Implementierungsgraden nicht ausreichend zum Überflutungsschutz geeignet. Allerdings können sie durch ihre Anordnung im Straßenraum in Kombination mit anderen RWBA umgesetzt werden, die bspw. Dachflächen bewirtschaften.

Tabelle 6-1 fasst die Schlussfolgerungen der vorherigen Abschnitte zusammen und zeigt eine Kategorisierung sowie ein Ranking der untersuchten RWBA in Bezug auf ihre Wirkung zur Überflutungsminderung.

Tabelle 6-1: Kategorisierung und Ranking der untersuchten RWBA hinsichtlich ihres Effekts zur Überflutungsminderung

| Überflutungs- minderung | Ranking der untersuchten RWBA | | | |
|----------------------------|---|---|--|--|
| sehr hoch | <p style="text-align: center;">1</p>  <p style="text-align: center;">Retentionsdach</p> | <p style="text-align: center;">2</p>  <p style="text-align: center;">Intensives GD</p> | <p style="text-align: center;">3</p>  <p style="text-align: center;">MRE 100 a</p> | |
| | hoch | <p style="text-align: center;">4</p>  <p style="text-align: center;">Rigole 100 a</p> | <p style="text-align: center;">5</p>  <p style="text-align: center;">Mulde 100 a</p> | <p style="text-align: center;">6</p>  <p style="text-align: center;">Extensives GD</p> |
| | | mittel | <p style="text-align: center;">7</p>  <p style="text-align: center;">Retentionszisterne gedrosselt</p> | <p style="text-align: center;">8</p>  <p style="text-align: center;">Retentionszisterne ungedrosselt</p> |
| gering | | | <p style="text-align: center;">12</p>  <p style="text-align: center;">Zisterne</p> | |
| | | | | |
| vernachlässigbar | <p style="text-align: center;">13</p>  <p style="text-align: center;">Baumrigole</p> | | <p style="text-align: center;">14</p>  <p style="text-align: center;">HOB</p> | |

6.2 Einfluss des Implementierungsgrades der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen

Wie zu erwarten, hat der Implementierungsgrad der RWBA einen hohen Einfluss auf ihre überflutungsmindernde Wirkung im Starkregenfall (siehe Kapitel 4.2). Bei mäßiger Überlastung des Entwässerungssystems infolge weniger intensiver Starkregenergebnisse können die Anlagen bereits bei niedrigeren Implementierungsgraden das Überflutungsvolumen an der Oberfläche deutlich reduzieren. Wenn hingegen das Entwässerungssystem durch einen extremen Starkregen weit über seine Kapazität hinaus überlastet ist, ist die Reduktion des Überflutungsvolumens proportional zum Implementierungsgrad der Anlagen.

6.3 Einfluss der Niederschlagscharakteristik

Die zeitliche Niederschlagsverteilung hat einen großen Einfluss auf das Überflutungsgeschehen: Niederschlagsereignisse mit ausgeprägten Intensitätsspitzen führen bekanntermaßen zu höheren maximalen Wasserständen als gleichmäßig verteilte Niederschläge (siehe Kapitel 4.3). Dieser Umstand ist ohne RWBA deutlich ausgeprägter als mit RWBA. Die Anlagen können somit Intensitätsspitzen abpuffern und so Überflutungen abschwächen. Der Quervergleich der relativen Unterschiede der Überflutungsvolumina infolge der unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen zeigt bei den RWBA ähnlich große Unterschiede. Somit reagieren sie allgemein robust gegenüber unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen, wobei die leistungsfähigeren Anlagen noch leicht robuster sind. Die Ausnahme bilden Zisternen, hydrologisch optimierte Baumstandorte und Baumrigolen, die aufgrund ihrer geringeren Leistungsfähigkeit Intensitätsspitzen nur unzureichend abpuffern können.

Die Regendauer hat einen wesentlichen Einfluss auf den überflutungsmindernden Effekt von Versickerungsanlagen (siehe Kapitel 4.4). Der Anteil des infiltrierten Niederschlags steigt mit der Dauer des Regenereignisses und der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens. Somit sind Versickerungsanlagen bei langanhaltenden Niederschlägen und stark versickerungsfähigen Böden besonders leistungsfähig.

6.4 Einfluss der räumlichen Verteilung der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen

Die Anordnung der RWBA hat einen erheblichen Einfluss auf die maximalen Wasserstände in Überflutungsschwerpunkten (siehe Kapitel 4.5). Für eine maximale Reduzierung sollten RWBA gezielt um Überflutungsschwerpunkte angeordnet werden. Aller-

dings ist zu berücksichtigen, dass das Untersuchungsgebiet in dieser Arbeit topografisch flach ausgeprägt ist. Es ist davon auszugehen, dass bei steileren Einzugsgebieten Überflutungsschwerpunkte in Senkenlagen stärker durch oberirdische Fließwege und kanalindizierte Überflutungen geprägt sind und somit eine direkte Anordnung der RWBA um den Überflutungsschwerpunkt weniger Effekt hat.

6.5 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Einzugsgebiete

Der Effekt von RWBA zur Überflutungsminderung kann nur unzureichend auf andere Einzugsgebiete (EZG) übertragen werden (siehe Kapitel 5). Die Wirkungskurven erlauben lediglich eine Einschätzung der Größenordnung des Effekts für andere EZG. Allerdings kann durch Anwendung der Kurven über das Excel-Tool eine erste Vorauswahl und Priorisierung von RWBA zur Starkregenvorsorge für neue EZG erfolgen, da der relative Effekt der Anlagen untereinander gebietsunabhängig ist. Auf konzeptioneller Ebene können Planer bei der Umsetzung von RWBA als Maßnahmen des Überflutungsschutzes unterstützt werden.

7 Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Effekt verschiedener RWBA zur Überflutungsminderung analysiert, wobei der Leistungsvergleich und die Bewertung der Anlagen ausschließlich auf der quantitativen Reduktion des Überflutungsvolumens basieren. Für die Entscheidung, welcher Anlagentyp in einem Gebiet umgesetzt werden soll, reicht dieses Kriterium allerdings nicht aus: Die Kosten spielen dabei eine entscheidende Rolle. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit sollte der überflutungsmindernde Effekt der Anlagen zusammen mit den Investitions- und Betriebskosten in einer Kosten-Nutzen-Analyse betrachtet werden. Dazu muss der Nutzen der Anlagen, also die Überflutungsminderung, monetär ausgedrückt werden. Dies kann zum Beispiel durch die Quantifizierung vermiedener Schäden an Gebäuden geschehen.

Von den untersuchten RWBA haben die intensiven Grün- und Retentionsdächer den größten Effekt zur Überflutungsminderung und können selbst das 100 mm Ereignis zurückhalten. Allerdings wird die Leistungsfähigkeit von Gründächern maßgeblich durch den Wassergehalt der Bodenschicht und der Retentionsschicht (sofern vorhanden) bestimmt, welcher wiederum von vorherigen Niederschlagsereignissen und der Evapotranspiration beeinflusst wird. Beide Faktoren werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da aufgrund der langen Berechnungszeit von 1D/2D-Modellen nur Einzelereignisse simuliert werden können. Für zukünftige Forschung sind Langzeitsimulationen mit Regenreihen erforderlich, in denen die Evapotranspiration adäquat berücksichtigt wird, um insbesondere das Verhalten von Gründächern realistischer abzubilden.

Der Implementierungsgrad der RWBA ist der maßgebliche Faktor für ihren überflutungsmindernden Effekt. In dieser Arbeit werden theoretische Implementierungsgrade simuliert, bei denen beispielsweise alle Dachflächen durch Versickerungsmulden oder Gründächer bewirtschaftet werden. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, eine systematische und vergleichende Bewertung der Überflutungswirkung verschiedener Anlagentypen zu ermöglichen. Im Bestand sind solche hohen Implementierungsgrade unrealistisch. In weiteren Forschungsarbeiten sollten die realen Randbedingungen zur Umsetzung von RWBA berücksichtigt und daraus realistisch mögliche Implementierungsgrade abgeleitet werden. Dazu müssen Informationen über die verfügbare versickerungsfähige Grünfläche, deren räumliche Nähe zur abflusswirksamen Fläche, die Umrüstbarkeit von Dachflächen zu Gründächern, den verfügbaren Platz für Zisternen in Gebäuden sowie die Umsetzung von modifizierten Straßenbäumen gesammelt werden.

Die Variation der Modellregen in Bezug auf Verteilung und Dauer hat gezeigt, dass die Niederschlagscharakteristik einen wesentlichen Einfluss auf die Überflutungsminderung durch RWBA hat. Für weiterführende Analysen sollten reale Niederschlagsereignisse und insbesondere Langzeitniederschlagsreihen simuliert werden, um deren Einfluss auf die Wirkung der Anlagen zu bestimmen.

Bezüglich der räumlichen Verteilung der RWBA im Untersuchungsgebiet hat sich gezeigt, dass diese für eine maximale Reduzierung des Überflutungsvolumens möglichst nahe am Überflutungsschwerpunkt angeordnet werden sollten. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass das Untersuchungsgebiet in dieser Arbeit topografisch flach ist. In weiteren Fallstudien sollte untersucht werden, ob in steilen Untersuchungsgebieten die räumliche Anordnung der RWBA einen geringeren Einfluss auf die Überflutungsminderung im Überflutungsschwerpunkt hat. Allgemein sollten die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen analog in einem steilen Untersuchungsgebiet durchgeführt werden, um den Einfluss der Topografie zu untersuchen.

Die Validierung der Wirkungskurven hat gezeigt, dass die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere EZG eingeschränkt ist. Die Überflutungsminderung durch die RWBA ist stark von den spezifischen Eigenschaften des Einzugsgebiets abhängig. Um die unterschiedlichen einzugsgebietspezifischen Eigenschaften zu berücksichtigen, müssen für eine Vielzahl von EZG Wirkungskurven erstellt werden. Anschließend müssen die EZG vereinfacht kategorisiert werden, z. B. über ihre Topografie oder Überflutungsanfälligkeit. Neue EZG, auf die die Wirkungskurven angewendet werden sollen, werden ebenfalls kategorisiert. Anschließend werden die passenden Wirkungskurven ausgewählt, um die Überflutungsminderung durch RWBA zu quantifizieren.

In Zukunft ist davon auszugehen, dass Regenwasserbewirtschaftungsanlagen als Maßnahmen der Klimaanpassung gegenüber Starkregen an Bedeutung gewinnen werden. Sie ermöglichen die Nachrüstung der bestehenden Entwässerungsinfrastruktur und tragen so zur Minderung von Überflutungsrisiken selbst bei extremen Niederschlägen bei. Darüber hinaus leisten sie einen Beitrag zur Verbesserung des Stadtklimas bei Hitzestress durch Verdunstung und Begrünung. Sie fördern die Artenvielfalt und erhöhen die Lebensqualität in urbanen Gebieten, indem sie grüne Freiräume schaffen und so die Aufenthaltsqualität steigern. Für die zukünftige Umsetzung ist vor allem ein ausgewogenes Verhältnis von Kosten und Nutzen sowie die Verfügbarkeit geeigneter Flächen im dicht besiedelten urbanen Raum ausschlaggebend.

Literaturverzeichnis

- Ahiablame, Laurent; Shakya, Ranish (2016): Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale. In: *Journal of environmental management* 171, S. 81–91. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.01.036.
- Aigner, Detlef; Bollrich, Gerhard (2021): Handbuch der Hydraulik für Wasserbau und Wasserwirtschaft. 2., überarbeitete Auflage. Berlin. Beuth.
- Almaaitah, Tamer; Appleby, Madison; Rosenblat, Howard; Drake, Jennifer; Joksimovic, Darko (2021): The potential of Blue-Green infrastructure as a climate change adaptation strategy: a systematic literature review. In: *Blue-Green Syst.* 3 (1), S. 223–248. DOI: 10.2166/bgs.2021.016.
- Bae, Chaeyoung; Lee, Dong Kun (2020): Effects of low-impact development practices for flood events at the catchment scale in a highly developed urban area. In: *International Journal of Disaster Risk Reduction* 44, S. 101412. DOI: 10.1016/j.ijdr.2019.101412.
- Bai, Yiran; Zhao, Na; Zhang, Ruoyu; Zeng, Xiaofan (2019): Storm Water Management of Low Impact Development in Urban Areas Based on SWMM. In: *Water* 11 (1), S. 33. DOI: 10.3390/w11010033.
- Baumgartner, Albert; Liebscher, Hans-Jürgen (1996): Allgemeine Hydrologie. Quantitative Hydrologie. 2. Auflage. Stuttgart. Gebrüder Borntraeger.
- Becker, Paul; Becker, Andreas; Dalelane, Clementine; Deutschländer, Thomas; Junghänel, Thomas; Walter, Andreas (2016): Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland. Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung. Hg. v. Deutscher Wetterdienst.
- Benden, J.; Broesi, R.; Illgen, M.; Leinweber, U.; Lennartz, G.; Scheid, C.; Schmitt, T. G. (2017): Multifunktionale Retentionsflächen. Teil 1: Wissenschaftliche Grundlagen. MURIEL Publikation.
- BlueGreenStreets (Hg.) (2022): BlueGreenStreets Toolbox - Teil B. Teil B. Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere, März 2022, Hamburg. Erstellt im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft“ (RES:Z).
- Bürger, Gerd; Pfister, Angela; Bronstert, Axel (2021): Zunehmende Starkregenintensitäten als Folge der Klimaerwärmung: Datenanalyse und Zukunftsprojektion. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 65 (6), S. 262–271. DOI: 10.5675/HYWA_2021.6_1.
- Burns, Matthew J.; Fletcher, Tim D.; Walsh, Christopher J.; Ladson, Anthony R.; Hatt, Belinda E. (2012): Hydrologic shortcomings of conventional urban stormwater management and opportunities for reform. In: *Landscape and Urban Planning* 105 (3), S. 230–240. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2011.12.012.
- Butler, David; Digman, Christopher; Makropoulos, Christos; Davis, John W. (2018): Urban Drainage. 4. Auflage. Florida. Crc Press Inc.

- Costa, Sandra; Peters, Rik; Martins, Ricardo; Postmes, Luuk; Keizer, Jan Jacob; Roebeling, Peter (2021): Effectiveness of Nature-Based Solutions on Pluvial Flood Hazard Mitigation: The Case Study of the City of Eindhoven (The Netherlands). In: *Resources* 10 (3), S. 24. DOI: 10.3390/resources10030024.
- Cui, Tingting; Long, Yuqiao; Wang, Yintang (2019): Choosing the LID for Urban Storm Management in the South of Taiyuan Basin by Comparing the Storm Water Reduction Efficiency. In: *Water* 11 (12), S. 2583. DOI: 10.3390/w11122583.
- Destatis (Hg.) (2024): The largest cities worldwide 2023 - Statistisches Bundesamt Deutschland (Destatis). Online verfügbar unter [133](https://www.destatis.de/EN/Themes/Countries-Regions/International-Statistics/Data-Topic/Population-Labour-Social-Issues/DemographyMigration/UrbanPopulation.html#:~:text=International%20statistics%20The%20largest%20cities%20worldwide%202023&text=Mid%2D2023%20approximately%204.6%20of,57%25%20of%20the%20global%20population, zuletzt geprüft am 16.01.2024.</p><p>DIN (2017): DIN EN 752, Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden – Kanalmanagement; Deutsche Fassung EN 752:2017. Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth Verlag GmbH. Berlin.</p><p>DIN (2024): DIN EN 16941-1, Vor-Ort-Anlagen für Nicht-Trinkwasser -Teil 1: Anlagen für die Verwendung von Regenwasser; Deutsche Fassung EN 16941-1:2024. Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth Verlag GmbH. Berlin.</p><p>Dobkowitz, Sophia; Bronstert, Axel; Heistermann, Maik (2025): Water retention by green infrastructure to mitigate urban flooding: a meta-analysis. In: <i>Urban Water Journal</i> 22 (5), S. 477–492. DOI: 10.1080/1573062X.2025.2472325.</p><p>DWA (2006a): Arbeitsblatt DWA-A 100, Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung (ISiE). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Hennef.</p><p>DWA (2006b): Arbeitsblatt DWA-A 110, Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserleitungen und -kanälen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Hennef.</p><p>DWA (2013): Arbeitsblatt DWA-A 117, Bemessung von Regenrückhalteräumen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Hennef.</p><p>DWA (2016): Merkblatt DWA-M 119, Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Hennef.</p><p>DWA (2021): Merkblatt DWA-M 165-1, Niederschlag-Abfluss- und Schmutzfrachtmodelle in der Siedlungsentwässerung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Hennef.</p><p>DWA (2024a): Arbeitsblatt DWA-A 118, Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Hennef.</p><p>DWA (2024b): Arbeitsblatt DWA-A 138-1, Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser – Teil 1: Planung, Bau, Betrieb. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Hennef.</p></div><div data-bbox=)

- DWA (2024c): Arbeitsblatt DWA-A 531, Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer (Entwurf). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Hennef.
- DWD (Hg.) (2023): KOSTRA-DWD-2020 Datensatz - Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/return_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA_DWD_2020/gis/, zuletzt geprüft am 17.01.2024.
- DWD (Hg.) (2024): Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2023 Deutscher Wetterdienst, Geschäftsbereich Klima und Umwelt. Offenbach.
- DWD (Hg.) (2025): Warnschwellenwerte Starkregen - Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html>, zuletzt geprüft am 25.03.2025.
- Fletcher, Tim D.; Shuster, William; Hunt, William F.; Ashley, Richard; Butler, David; Arthur, Scott et al. (2015): SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. In: *Urban Water J.* 12 (7), S. 525–542. DOI: 10.1080/1573062X.2014.916314.
- FLL (2010): Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. Bonn.
- FLL (2015): Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 1: Planung, Pflanzarbeiten, Pflege. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. Bonn.
- FLL (2018): Dachbegrünungsrichtlinien, Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. Bonn.
- GDV (Hg.) (2020): Naturgefahrenreport 2020. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Berlin.
- Haghighatafshar, Salar; Nordlöf, Beatrice; Roldin, Maria; Gustafsson, Lars-Göran; La Cour Jansen, Jes; Jönsson, Karin (2018): Efficiency of blue-green stormwater retrofits for flood mitigation - Conclusions drawn from a case study in Malmö, Sweden. In: *J. Environ. Manage.* 207, S. 60–69. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.11.018.
- Hamel, Perrine; Fletcher, Tim D. (2014): The impact of stormwater source-control strategies on the (low) flow regime of urban catchments. In: *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 69 (4), S. 739–745. DOI: 10.2166/wst.2013.772.
- Hamers, Eike M.; Maier, Holger R.; Zecchin, Aaron C.; van Delden, Hedwig (2023): Effectiveness of Nature-Based Solutions for Mitigating the Impact of Pluvial Flooding in Urban Areas at the Regional Scale. In: *Water* 15 (4), S. 642. DOI: 10.3390/w15040642.

- Hürter, Hagen (2018): Erarbeitung gebietsspezifischer Anwendungsempfehlungen für bi-direktional gekoppelte 1D-2D-Überflutungsberechnungen. Dissertation. Kaiserslautern (Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen, Band 2). Online verfügbar unter <https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/index/index/start/1/rows/10/sortfield/score/sortorder/desc/searchtype/simple/query/h%C3%BCrter/docId/5344>, zuletzt geprüft am 30.05.2022.
- Iffland, Ronja; Förster, Kristian; Westerholt, Daniel; Pesci, María Herminia; Lösken, Gilbert (2021): Robust Vegetation Parameterization for Green Roofs in the EPA Stormwater Management Model (SWMM). In: *Hydrology* 8 (1), S. 12. DOI: 10.3390/hydrology8010012.
- Jeffers, Scott; Garner, Brad; Hidalgo, Derek; Daoularis, Dionisi; Warmerdam, Oscar (2022): Insights into green roof modeling using SWMM LID controls for detention-based designs. In: *JWMM* 30: C484. DOI: 10.14796/JWMM.C484.
- Junghänel, Thomas; Ostermüller, Jennifer; Deutschländer, Thomas (2023): KOSTRA-DWD-2020. Hinweise und Hilfestellungen zur Verwendung des KOSTRA-DWD-Datensatzes Version 2020.
- Kolesch, Dominik; Neumann, Jonas; Scheid, Christian; Engel, Teresa; Rentschler, Christoph; Langer, Martin et al. (2022): SENSARE - Sensorbasierte Stadtgebietsanalyse für Starkregengefährdungen zur Warnung und Resilienzverbesserung der Verkehrsinfrastruktur. Gemeinsamer Abschlussbericht des Verbundprojekts. Berlin.
- Lee, Hoesung; Calvin, Katherine; Dasgupta, Dipak; Krinner, Gerhard; Mukherji, Aditi; Thorne, Peter W. et al. (2023): IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. Hg. v. IPCC.
- Lenderink, Geert; van Meijgaard, Erik (2008): Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. In: *Nature Geosci* 1 (8), S. 511–514. DOI: 10.1038/ngeo262.
- Lenderink, Geert; van Meijgaard, Erik (2010): Linking increases in hourly precipitation extremes to atmospheric temperature and moisture changes. In: *Environ. Res. Lett.* 5 (2), S. 25208. DOI: 10.1088/1748-9326/5/2/025208.
- Maniak, Ulrich (2016): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. 7. Auflage. Wiesbaden. Springer Vieweg.
- Mei, Chao; Liu, Jiahong; Wang, Hao; Yang, Zhiyong; Ding, Xiangyi; Shao, Weiwei (2018): Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed. In: *The Science of the total environment* 639, S. 1394–1407. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.199.
- Mu, Jie; Huang, Miansong; Hao, Xiaoli; Chen, Xiaolan; Yu, Haijun; Wu, Binbin (2022): Study on Waterlogging Reduction Effect of LID Facilities in Collapsible Loess Area Based on Coupled 1D and 2D Hydrodynamic Model. In: *Water* 14 (23), S. 3880. DOI: 10.3390/w14233880.

- Mugume, Seith N.; Kibibi, Hilary; Sorensen, Johanna; Butler, David (2024): Can Blue-Green Infrastructure enhance resilience in urban drainage systems during failure conditions? In: *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 89 (4), S. 915–944. DOI: 10.2166/wst.2024.032.
- Murawski, Aline; Zimmer, Janek; Merz, Bruno (2016): High spatial and temporal organization of changes in precipitation over Germany for 1951–2006. In: *Intl Journal of Climatology* 36 (6), S. 2582–2597. DOI: 10.1002/joc.4514.
- Neumann, Jonas; Scheid, Christian; Dittmer, Ulrich; Kolesch, Dominik (2021): Validierung eines Starkregenüberflutungsmodells anhand von Beobachtungsdaten. Konferenzbeitrag. In: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV) (Hg.): *Aqua Urbanica 2021. Schwammstadt - Versickerung 2.0?* Universität Innsbruck, 13. und 14. September 2021. Wien, S. 180–184.
- Ortega Sandoval, Abby Daniela; Sörensen, Johanna; Rodríguez, Juan Pablo; Bharati, Luna (2023): Hydrologic-hydraulic assessment of SUDS control capacity using different modeling approaches: a case study in Bogotá, Colombia. In: *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 87 (12), S. 3124–3145. DOI: 10.2166/wst.2023.173.
- Peng, Zhangjie; Stovin, Virginia (2017): Independent Validation of the SWMM Green Roof Module. In: *Journal of Hydrologic Engineering* 22 (9). DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001558.
- Richter, Michael; Heinemann, Kirya; Meiser, Nadine; Dickhaut, Wolfgang (2024): Trees in Sponge Cities—A Systematic Review of Trees as a Component of Blue-Green Infrastructure, Vegetation Engineering Principles, and Stormwater Management. In *Water* 16 (5), S. 655. DOI: 10.3390/w16050655.
- Rossmann, L.; Huber, W. (2016): Storm Water Management Model Reference Manual. Volume III - Water Quality. Hg. v. United States Environmental Protection Agency (EPA). Washington, D.C. Online verfügbar unter <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100P2NY.PDF?Dockey=P100P2NY.PDF>, zuletzt geprüft am 10.01.2023.
- Schmitt, Theo G.; Krüger, Marc; Pfister, Angela; Becker, Michael; Mudersbach, Christoph; Fuchs, Lothar et al. (2018): Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. In: *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall* 65 (Nr. 2), 113–120.
- Schmitt, Theo G.; Thomas, Martin; Ettrich, Norman (2004): Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. In: *J. Hydrol.* 299 (3-4), S. 300–311. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.012.
- Schneider, Frank; Helmreich, Brigitte; Gelhar, Tom (2017): Bemessungsansätze für Versickerungsanlagen im internationalen Vergleich, Teil 1: Bemessungsansätze in unterschiedlichen Ländern. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 17 (1), S. 22–23.
- Schubert, Jochen E.; Burns, Matthew J.; Fletcher, Tim D.; Sanders, Brett F. (2017): A framework for the case-specific assessment of Green Infrastructure in mitigating urban flood hazards. In: *Advances in Water Resources* 108, S. 55–68. DOI: 10.1016/j.advwatres.2017.07.009.

- SenSBW (Hg.) (2025): Fachübergreifendes Informationssystem. Online Zugriff auf Karten, Pläne und andere Daten - Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Bauen und Wohnen. Online verfügbar unter <https://www.berlin.de/umwelt/themen/umweltdaten/artikel.261360.php#:~:text=Der%20FIS%2DBroker%20bietet%20den,auf%20diese%20Daten%20zu%20organisieren>, zuletzt geprüft am 03.02.2025.
- Sörensen, J.; Emilsson, T. (2019): Evaluating Flood Risk Reduction by Urban Blue-Green Infrastructure Using Insurance Data. In: *J. Water Resour. Plann. Manage.* 145 (2). DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001037.
- Statista (Hg.) (2024): Share of urban population worldwide in 2023, by continent - Statista. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/270860/urbanization-by-continent/>, zuletzt geprüft am 16.01.2024.
- UBA (Hg.) (2024): Definition des Begriffs Regenwasserbewirtschaftung - Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasserbewirtschaften/regenwasserbewirtschaftung>, zuletzt geprüft am 07.02.2025.
- Webber, J. L.; Fletcher, T. D.; Cunningham, L.; Fu, G.; Butler, D.; Burns, M. J. (2020): Is green infrastructure a viable strategy for managing urban surface water flooding? In: *Urban Water Journal* 17 (7), S. 598–608. DOI: 10.1080/1573062X.2019.1700286.

Anhangsverzeichnis

Anhang A1: *Bemessung von Versickerungsanlagen nach dem Einfachen Verfahren*

Für die Ermittlung des Speichervolumens von Versickerungsanlagen gilt im Einfachen Verfahren die Kontinuitätsbedingung nach Gleichung (1), bei der das Zufluss- und das Versickerungsvolumen berücksichtigt werden (DWA 2024):

$$V_{VA} = (Q_{zu} - Q_S) \cdot D \cdot 60 \cdot f_Z \cdot f_A \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

mit:

V_{VA} = erforderliches Speichervolumen [m³]

Q_{zu} = Zufluss der Versickerungsanlage während der Dauerstufe D [l/s]

Q_S = Versickerungsleistung [l/s]

D = Dauerstufe des Bemessungsregens [min]

f_Z = Zuschlagsfaktor [-]

Die maßgebende Dauerstufe des Bemessungsregens ist zunächst unbekannt und wird schrittweise erhöht, bis das erforderliche Speichervolumen ein Maximum erreicht. Der Zuschlagsfaktor dient der Vermeidung einer möglichen Unterbemessung der Anlage und liegt je nach Risikomaß gemäß Arbeitsblatt DWA-A 117 (DWA 2012) zwischen 1,1 und 1,2.

Der Zufluss berechnet sich wie folgt:

$$Q_{zu} = r_{D(n)} \cdot (AC + A_{VA}) \cdot 10^{-4} \quad (2)$$

mit:

Q_{zu} = Zufluss zur Versickerungsanlage während der Dauerstufe D [l/s]

$r_{D(n)}$ = Regenspende der Dauerstufe D und Bemessungshäufigkeit n [l/(s·ha)]

AC = Rechenwert für die Bemessung, der sich aus der Summe aller an die Versickerungsanlage angeschlossenen Teilflächen, multipliziert mit dem jeweils zugehörigen Abflussbeiwert (siehe Gleichung (3)) [m²]

A_{VA} = überregnete Fläche einer oberirdischen Versickerungsanlage [m²]

$$AC = \sum (A_{E,b,a,i} \cdot C_i) + \sum (A_{E,nb,a,i} \cdot C_i) \quad (3)$$

mit:

$A_{E,b,a,i}$ = befestigte, angeschlossene Teilfläche im Einzugsgebiet der Versickerungsanlage [m²]

$A_{E,nb,a,i}$ = nicht befestigte, angeschlossene Teilfläche im Einzugsgebiet der Versickerungsanlage [m²]

Q_i = Abflussbeiwert der Teilfläche [-]

Die Versickerungsleistung wird folgendermaßen berechnet:

$$Q_S = k_i \cdot A_S \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

mit:

Q_S = Versickerungsleistung [l/s]

k_i = bemessungsrelevante Infiltrationsrate [m/s]

A_S = erforderliche Versickerungsfläche [m²]

Der k_i -Wert als bemessungsrelevante Infiltrationsrate wird als konstant angenommen und folgendermaßen berechnet:

$$k_i = k \cdot f_K \quad (5)$$

mit:

k_i = bemessungsrelevante Infiltrationsrate [m/s]

k = Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens, z. B. k_f -Wert [m/s]

f_K = resultierende Korrekturfaktor Wasserdurchlässigkeit [-]

Durch den Korrekturfaktor f_K werden die Einflüsse der Bestimmungsmethode und der Variabilität des Bodens auf den k_f -Werts berücksichtigt. Der Korrekturfaktor ist ≤ 1 und wird wie folgt berechnet:

$$f_K = f_{Ort} \cdot f_{Methode} \quad (6)$$

mit:

f_{Ort} = Korrekturfaktor zur Erfassung der Variabilität der Bodenverhältnisse und Umfang/Anzahl der Versuchsstandorte nach Tabelle 10 in DWA-A 138-1 (DWA 2024)

$f_{Methode}$ = Korrekturfaktor für Bestimmungsmethode nach Tabelle 11 in
DWA-A 138-1 (DWA 2024)

Weitere Erklärungen zu den beiden Korrekturfaktoren f_{Ort} und $f_{Methode}$ sind DWA-A 138-1 (DWA 2024) zu entnehmen.

Anhang A2: *Bemessung Versickerungsmulde*

Bei der Bemessung von Versickerungsmulden nach dem Einfachen Verfahren wird das erforderliche Speichervolumen unter der Annahme einer konstanten Versickerungsleistung ($A_{S,m}$ und k_i konstant) nach folgender Gleichung (7) bestimmt (DWA 2024):

$$V_M = [(AC + A_{VA}) \cdot 10^{-7} \cdot r_{D(n)} - A_{S,m} \cdot k_i] \cdot D \cdot 60 \cdot f_Z \quad (7)$$

mit:

V_M = erforderliches Speichervolumen der Mulde [m³]

AC = Rechenwert für die Bemessung, der sich aus der Summe aller an die Versickerungsanlage angeschlossenen Teilflächen, multipliziert mit dem jeweils zugehörigen mittleren Abflussbeiwert ergibt [m²]

A_{VA} = überregnete Fläche der oberirdischen Versickerungsanlage/Mulde [m²]

$r_{D(n)}$ = Regenspende für die Dauerstufe D und Bemessungshäufigkeit n [l/(s·ha)]

$A_{S,m}$ = mittlere Versickerungsfläche der Mulde [m²]

k_i = bemessungsrelevante Infiltrationsrate nach Gleichung (5) [m/s]

D = Dauerstufe des Bemessungsregens [min]

f_Z = Zuschlagsfaktor [-]

Dabei kann im vereinfachten Verfahren die überregnete Fläche der Mulde gleich der mittleren Versickerungsfläche der Mulde gesetzt werden.

Bei einer vorgegebenen maximalen Einstauhöhe h_M der Mulde kann der erforderliche Flächenbedarf der Mulde abgeschätzt werden und das erforderliche Speichervolumen näherungsweise nach Gleichung (8) bestimmt werden:

$$V_M = A_{S,m} \cdot h_M \quad (8)$$

mit:

h_M = maximale Einstauhöhe der Mulde [m]

Wird die Gleichung (8) in (7) eingesetzt, anschließend nach $A_{S,m}$ aufgelöst und A_{VA} vernachlässigt, erhält man folgende Gleichung (9):

$$A_{S,m} = \frac{AC \cdot 10^{-7} \cdot r_{D(n)}}{\frac{h_M}{D \cdot 60 \cdot f_Z} + k_i} \quad (9)$$

Die mittlere Versickerungsfläche wird für unterschiedliche Dauerstufen iterativ ermittelt, wobei die größte mittlere Versickerungsfläche als maßgeblich herangezogen wird (DWA 2024).

Anhang A3: Bemessung Rigole

Bei der Bemessung von Rigolen nach dem Einfachen Verfahren werden vereinfacht eine konstante Versickerungsfläche, homogene Untergrundverhältnisse und ein mittlerer Wasserstand von $h_R/2$ während des gesamten Einstauereignisses angenommen. Unter diesen Annahmen kann die Versickerungsfläche einer Rigole nach Gleichung (10) berechnet werden (DWA 2024):

$$A_{S,m} = \left(b_R + 2 \cdot \frac{h_R}{2}\right) \cdot L_R + \left(b_R \cdot \frac{h_R}{2}\right) \cdot 2 = (b_R + h_R) \cdot L_R + b_R \cdot h_R \quad (10)$$

mit:

$A_{S,m}$ = mittlere Versickerungsfläche der Rigole [m²]

b_R = Breite der Rigole [m]

h_R = Höhe der Rigole [m]

L_R = Länge der Rigole [m]

Die Versickerungsleistung der Rigole berechnet sich nach Gleichung (11):

$$Q_S = [(b_R + h_R) \cdot L_R + b_R \cdot h_R] \cdot k_i \quad (11)$$

mit:

Q_S = Versickerungsleistung der Rigole [m³/s]

k_i = bemessungsrelevante Infiltrationsrate nach Gleichung (5) [m/s]

Eingesetzt in die Kontinuitätsbedingung (Gleichung (1)) kann das Speichervolumen der Rigole V_R folgendermaßen berechnet werden:

$$V_R = [AC \cdot 10^{-7} \cdot r_{D(n)} - [(b_R + h_R) \cdot L_R + b_R \cdot h_R] \cdot k_i - Q_{Dr} \cdot 10^{-3}] \cdot D \cdot 60 \cdot f_Z \quad (12)$$

mit:

V_R = Speichervolumen der Rigole [m³]

Q_{Dr} = mittlerer, konstanter Drosselabfluss [l/s]

Unter der Annahme einer quaderförmigen Rigole kann das Speichervolumen der Rigole wie in Gleichung (13) berechnet werden, wobei die Speicherkapazität der Rigole durch den Speicherkoeffizienten s_R bestimmt wird:

$$V_R = b_R \cdot h_R \cdot L_R \cdot s_R \quad (13)$$

mit:

$s_R =$ Speicherkoeffizient, Anteil des verfügbaren Speichervolumens in der Rigole [-]

Der Speicherkoeffizient kann bei Fertigteilen den Herstellerangaben entnommen werden oder aus dem Porenanteil des Füllmaterials und dem Volumen der eingebetteten Vollsickerrohre berechnet werden (siehe DWA 2024).

Die Zielgröße bei der Bemessung der Rigole ist die erforderliche Länge L_R , b_R und h_R werden festgelegt. Wird Gleichung (13) in Gleichung (12) eingesetzt und nach L_R aufgelöst, ergibt sich die Bemessungsgleichung für die Rigole:

$$L_R = \frac{AC \cdot 10^{-7} \cdot r_{D(n)} - (b_R \cdot h_R) \cdot k_i - Q_{Dr} \cdot 10^{-3}}{\frac{b_R \cdot h_R \cdot s_R}{D \cdot 60 \cdot f_Z} + (b_R + h_R) \cdot k_i} \quad (14)$$

Analog zur Bestimmung der Muldenversickerungsfläche wird die erforderliche Länge L_R der Rigole iterativ für unterschiedliche Dauerstufen D mit den dazugehörigen Regenspenden $r_{D(n)}$ ermittelt (DWA 2024).

Anhang A4: *Bemessung Mulden-Rigolen-Element*

Wenn ein Überlauf von der Mulde in die Rigole vorhanden ist, wird das erforderliche Speichervolumen des MRE wie folgt berechnet:

$$V_{MR} = V_M + V_R \quad (15)$$

mit:

V_{MR} = erforderliches Speichervolumen des MRE [m³]

V_M = erforderliches Speichervolumen der Mulde [m³]

V_R = erforderliches Speichervolumen der Rigole [m³]

Zuerst wird das erforderliche Muldenvolumen nach Gleichung (9) bestimmt. In der Regel wird die Mulde des MRE mit einer Bemessungshäufigkeit von $n = 1/a$ dimensioniert und die Rigole mit einer geringeren Bemessungshäufigkeit.

Das erforderliche Volumen der Rigole ergibt sich durch Umstellen der Gleichung (15) zu:

$$V_R = V_{MR} - V_M \quad (16)$$

Das erforderliche Gesamtvolumen V_{MR} ergibt sich aus der Kontinuitätsbedingung (Gleichung (1)), wobei die Versickerung aus dem MRE durch die Rigole erfolgt und der Zufluss in das MRE durch die Mulde erfolgt.

Das Gesamtvolumen des MRE wird je nach gewähltem Rigolenquerschnitt unter Anwendung Gleichung (14) wie folgt berechnet:

$$V_{MR} = [(AC + A_{VA}) \cdot 10^{-7} \cdot r_{D(n)} - ((b_R + h_R) \cdot L_R + b_R \cdot h_R) \cdot k_i] \cdot D \cdot 60 \cdot f_Z \quad (17)$$

Als nächstes wird das Rigolenvolumen über die Rigolenlänge L_R berechnet. Dazu werden die Gleichungen (17) und (13) in Gleichung (16) eingesetzt. Durch Umformung ergibt sich folgende Gleichung (DWA 2024):

$$L_R = \frac{(AC + A_{VA}) \cdot 10^{-7} \cdot r_{D(n)} - b_R \cdot h_R \cdot k_i - \frac{V_M}{D \cdot 60 \cdot f_Z}}{\frac{b_R \cdot h_R \cdot S_R}{D \cdot 60 \cdot f_Z} + (b_R + h_R) \cdot k_i} \quad (18)$$

mit:

L_R = erforderliche Länge der Rigole [m]

- AC = Rechenwert für die Bemessung, der sich aus der Summe aller an die Versickerungsanlage angeschlossenen Teilflächen, multipliziert mit dem jeweils zugehörigen mittleren Abflussbeiwert ergibt [m²]
- A_{VA} = überregnete Fläche der Versickerungsanlage/Mulde [m²]
- $r_{D(n)}$ = Regenspende für die Dauerstufe D und Wiederkehrzeit T_n [l/s*ha]
- V_M = erforderliches Speichervolumen der Mulde des Mulden-Rigolen-Elements [m³]
- f_Z = Zuschlagsfaktor [-]
- b_R = Breite der Rigole [m]
- h_R = Höhe der Rigole [m]
- S_R = Speicherkoeffizient der Rigole [-]
- D = Dauerstufe des Bemessungsregens [min]
- k_i = bemessungsrelevante Infiltrationsrate nach Gleichung (5) [m/s]

Die erforderliche Länge L_R der Rigole wird iterativ für unterschiedliche Dauerstufen D mit den dazugehörigen Regenspenden $r_{D(n)}$ ermittelt. Die Muldenbreite und -länge sind an die Rigole anzupassen (DWA 2024).

Anhang A5: Bemessung Zisterne auf Regenwassertrag

Das Regenwasservolumen, das potenziell in einem Jahr von verschiedenen Flächen gesammelt werden kann, wird nach DIN EN 16941-1 (DIN EN 2024) folgendermaßen berechnet:

$$Y_{R,a} = \sum (A_i \cdot e_i) \cdot h_a \cdot \eta \quad (19)$$

mit:

- $Y_{R,a}$ = Regenwasserertrag pro Jahr [l]
- A_i = Auffangfläche, deren Abfluss der Zisterne zufließt [m²]
- e_i = Oberflächenertragsbeiwert (z. B. 0,8 für Betondachstein)
- h_a = Jahresniederschlagshöhe
- η = Beiwert zum hydraulischen Wirkungsgrad der Behandlung

Mit dem Regenwasserertrag pro Tag wird die Größe der Zisterne nach Gleichung berechnet:

$$V_N = Y_{R,a} \cdot \left(\frac{d_d}{365}\right) \quad (20)$$

mit:

- V_N = Nutzvolumen der Zisterne [l]
- d_d = gewählte Trockenperiode, z.B. 21 Tage für Deutschland [d]

Anhang A6: *Bemessung Retentionszisterne*

Das Volumen der Retentionszisterne setzt sich aus dem Nutz- und Retentionsvolumen zusammen. Das Nutzvolumen wird wie bei der Zisterne ermittelt, während das Retentionsvolumen in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe des Starkregens bestimmt wird, der zurückgehalten werden soll:

$$V_{Re} = h_N \cdot A_i \cdot C_s \quad (21)$$

mit:

V_{Re} = Retentionsvolumen der Zisterne [l]

h_N = Niederschlagshöhe des zurückzuhaltenden Starkregens [mm]

A_i = Auffangfläche, deren Abfluss der Zisterne zufließt [m²]

C_s = Spitzenabflussbeiwert der Auffangfläche

$$V_{RZ} = V_N + V_{Re} \quad (22)$$

mit:

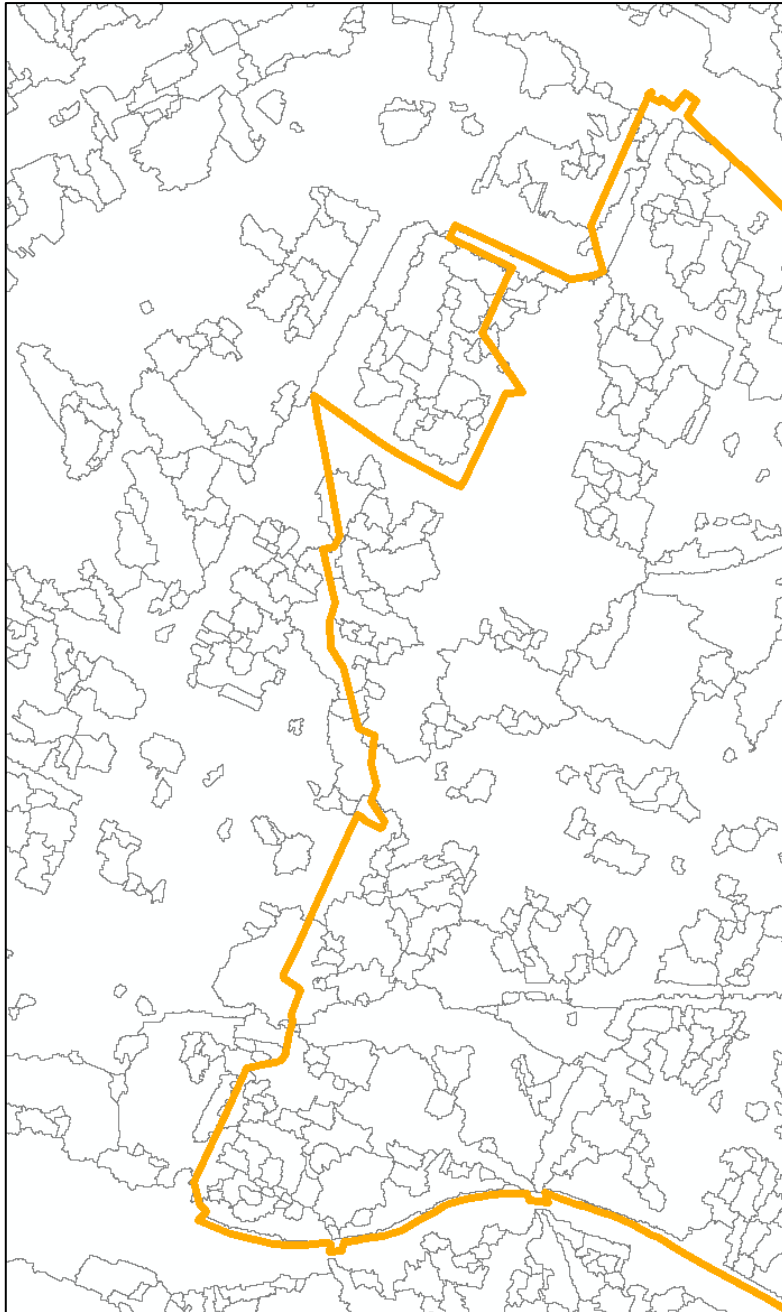
V_{RZ} = Gesamtvolumen der Retentionszisterne [l]

V_N = Nutzvolumen der Zisterne [l]

Anhang A7: Zusammenstellung der Eigenschaften sowie Abbildung der Untersuchungsgebiete und der RWBA in den verschiedenen Studien

| Autoren | Jahr | Untersuchungsgebiet | | | | Regenwasserbewirtschaftungsanlagen | | | | Regenereignisse |
|------------------------|------|-------------------------|--|---|---------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---|--|
| | | Stadt, Land | Eigenschaften | Größe | Skala | Modell | Abbildung | Anlagen* | Aufbau/Umsetzung | |
| Ahiablame et al. | 2016 | Normal-Sugar Creek, USA | Befestigungsgrad: 80 % | 87,6 km ² | Region | 1D | SWMM LID | <i>PP, RWHT, RG</i> | <i>PP</i> bei Straßen, 50 % Dachfläche an <i>RWHT</i> | Regenreihe |
| Bae und Lee | 2020 | Seoul, South Korea | Befestigungsgrade: 80 & 85 % | 198,9 ha und 192,6 ha | Viertel | 1D | SWMM LID | <i>PP, GR</i> | <i>green roofs</i> : 22,3 ha & 27,6 ha; <i>permable pavements</i> : 6,98 ha | $h_N = 293 \text{ mm}$, $D = 14 \text{ h}$, $h_N = 415$, $D = 30 \text{ h}$ |
| Bai et al. | 2019 | Sucheng, China | Befestigungsgrad: 69 % | 260 ha | Viertel | 1D | SWMM LID | <i>PP, IT, BRC, S GR, RWHT</i> | Standardaufbau in der Höhe, Fläche: 74,4 ha | $T = 1 \text{ a}$, 3 a, 5 a $D = 2 \text{ h}$, 3 h |
| Costa et al. | 2021 | Eindhoven, Niederlande | lehmige Böden, hoher Versiegelungsgrad | 89 km ² | Stadt | 1D/2D | kein Abfluss von angeschl. Flächen | <i>PP, GR, IT</i> | 50 % der Dächer und Wege angeschlossen | $T = 5 \text{ a}$, 10 a, 100 a |
| Cui et al. | 2019 | Taiyuan, China | Befestigungsgrad: 65 % | 241 km ² | Region | 1D | SWMM LID | <i>PP, RG</i> | 5 % bis max 40 % der Fläche bewirtschaftet | $T = 1 - 100 \text{ a}$, $D = 15 - 180 \text{ min}$ |
| Haghighatafshar et al. | 2018 | Augustenborg, Schweden | abgekoppeltes EZG, kein Oberstrom Einfluss | 30 ha | Viertel | 1D/2D | Verringerung Infiltrationsrate | <i>IT, DP, GR, S</i> | 19,3 ha Gebietsfläche bewirtschaftet | $T = 100 \text{ a}$, 200 - 300 a, $D = 6 \text{ h}$ |
| Hamers et al. | 2023 | Adelaide, Australien | ländlich, einzelne Städte | 683,2 km ² | Region | 2D | Infiltration 100 mm/h | Kombinationen RWBA | RWBA nehmen 0,2 % der Fläche ein | $T = 10 \text{ a}$, 20 a, 50 a, $D = 1 \text{ h}$ |
| Mei et al. | 2018 | Peking, China | stark urbanisiert | 651,8 km ² | Region | 1D | SWMM LID | <i>BRC, GR, RWHT, S</i> | Abhängig von der Landnutzung RWBA verteilt | $T = 2 - 100 \text{ a}$ |
| Mu et al. | 2022 | Guyuan, China | hoch versiegelt, Löss im EZG | 42,6 km ² | Stadt | 1D/2D | SWMM LID | <i>IT, RWHT, S, RG</i> | Standardaufbau in der Höhe | $T = 2, 10, 50 \text{ a}$, $D = 2 \text{ h}$ |
| Mugume et al. | 2024 | Kampala, Uganda | stark urbanisiert | 33,1 km ² und 32,7 km ² | Stadt | 1D/2D | SWMM LID | <i>IT, BRC, DP, RWHT</i> | 60 % der Flächen an Versickerungsanlagen, <i>RWHT</i> : 5 m ³ | $T = 2, 5, 10, 25, 50, 100 \text{ a}$, $D = 30 \text{ h}$ |
| Ortega Sandoval et al. | 2023 | Bogota, Kolumbien | Befestigungsgrad 81 % | 50 ha | Viertel | 1D/2D | SWMM LID | <i>RWHT, TP</i> | GIS basiert Flächen ermittelt | $T = 5 \text{ a}$, 10 a, 100 a, $D = 3 \text{ h}$ |
| Webber et al. | 2020 | Melbourne, Australien | hochversiegelt, überflutungsgefährdet | 150 ha | Viertel | 1D/2D vereinfacht | Verringerung Regenhöhe | <i>GR, RWHT, PP, S</i> | <i>RWHT</i> : 2,5 m ³ / 100 m ² Dachfläche, 2 m ³ swale / 100 m ² bef. Fläche | $T = 20 \text{ a}$, 100 a |

* *S*: swale, *RG*: rain garden, *PP*: permeable pavement, *IT*: infiltration trench, *BRC*: bio-retention cell, *DP*: detention pond, *GR*: green roof, *RWHT*: rainwater harvesting tank, *TP*: tree pit



Anhang A8: Westliche Abgrenzung des Kanaleinzugsgebiets (orange) und Senkeneinzugsgebiete (schwarz umrandet) aus der topografischen Senkenanalyse. Allgemein gute Übereinstimmung der Abgrenzung des Kanaleinzugsgebiets mit der Abgrenzung der Senken. Das oberirdische Einzugsgebiet kann mit dem Kanaleinzugsgebiet gleichgesetzt werden.

Anhang A9: KOSTRA Daten für das Rasterfeld 105190 aus dem KOSTRA-DWD-2020 Daten (DWD 2023)

| Dauerstufe [min] | Niederschlagshöhe [mm] in Abhängigkeit der Jährlichkeit [a] T = | | | | | | |
|---------------------|---|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 5 | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 |
| 5 | 6,3 | 10,6 | 12,7 | 14,8 | 16,2 | 18,1 | 20,7 |
| 10 | 8,5 | 14,4 | 17,2 | 20,1 | 22 | 24,6 | 28,1 |
| 20 | 10,8 | 18,3 | 21,9 | 25,7 | 28,1 | 31,3 | 35,9 |
| 30 | 12,2 | 20,7 | 24,8 | 29 | 31,8 | 35,4 | 40,5 |
| 45 | 13,7 | 23,2 | 27,7 | 32,5 | 35,5 | 39,6 | 45,4 |
| 60 | 14,8 | 25 | 29,9 | 35 | 38,3 | 42,7 | 48,9 |
| 90 | 16,3 | 27,7 | 33,1 | 38,7 | 42,4 | 47,2 | 54,1 |
| 120 | 17,5 | 29,7 | 35,5 | 41,5 | 45,5 | 50,7 | 58,1 |
| 180 | 19,3 | 32,6 | 39,1 | 45,7 | 50,1 | 55,8 | 63,9 |

Anhang A10: Herstellerangaben zu Drosselabflüssen von Retentionszisternen

| Hersteller | | Volumen Retentionszisterne [m ³] | Drosselabfluss (einstellbar) [l/s] | Mittelwert Drosselabfluss [l/s] |
|-----------------|-----|--|--|---------------------------------------|
| Zisternenhandel | (1) | 15 | 0,5 - 7,6 | 4,05 |
| GRAF | (2) | 10 - 15 | 0,05 - 2 | 1,025 |
| Zisternenprofi | (3) | 5 | 0,1 - 2,5 | 1,3 |

(1) <https://www.zisternenhandel.de/retentionstank-neo-15000-l/a-712>

(2) <https://www.graf.info/de/retention/retentionszisternen/platin-xl-retentionszisterne.html>

(3) <https://www.zisternenprofi.de/retentionszisternen/572/retentions-flachtank-aqa.line-5000-liter?c=58>

Erläuterung:

In dieser Arbeit wird das Volumen und der Drosselabfluss (100 l/(s*ha)) der Retentionszisterne in Abhängigkeit der angeschlossenen Dachfläche berechnet. Bei 100 m² Dachfläche ergibt sich ein Volumen von ca. 5 m³ (4,87 m³) und ein Drosselabfluss von 1 l/s. Bei den Retentionszisternen der Hersteller liegt der Mittelwert des Drosselabflusses in Bezug auf 5 m³ Volumen bei

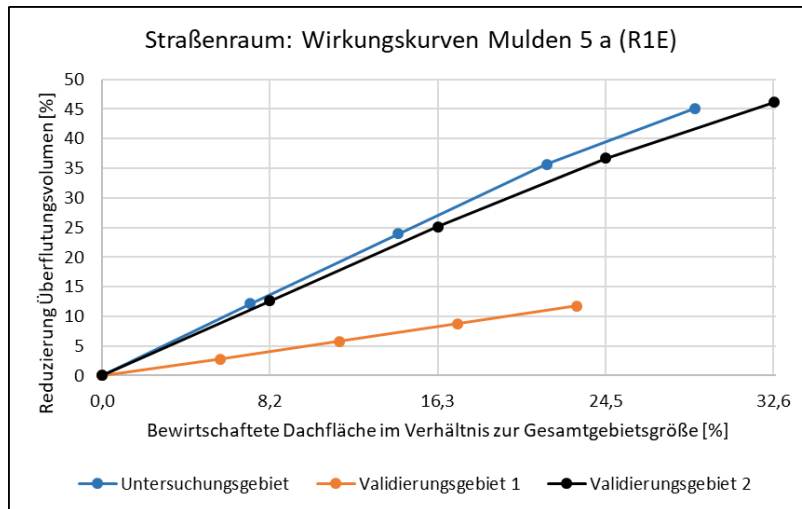
- (1): 1,35 l/s bei 5 m³ Volumen (runter gerechnet von 15 m³)
- (2): 0,34 - 0,51 l/s bei 5 m³ Volumen (runter gerechnet von 10 und 15 m³)
- (3): 1,3 l/s bei 5 m³ Volumen

Der in dieser Arbeit festgelegte Drosselabfluss von 1 l/s liegt zwischen den Herstellerangaben.

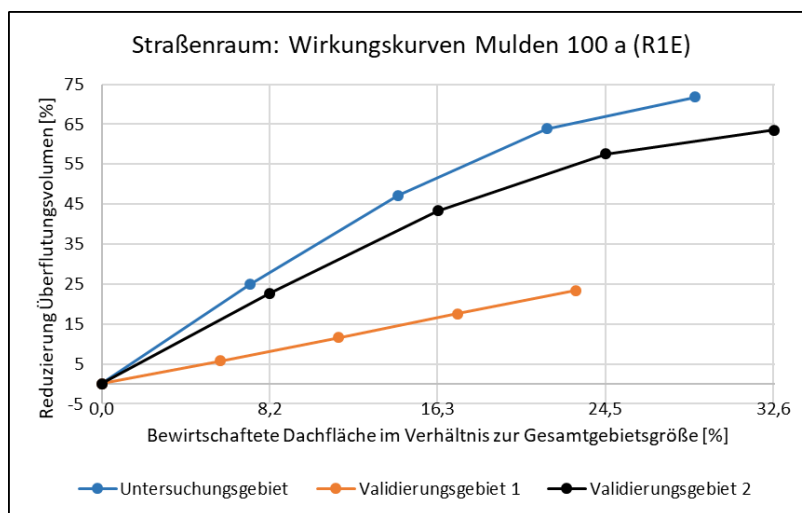
Anhang A11: Simulationsergebnisse für R1E und R2E bei einem Implementierungsgrad von 100 %

| Modell | R1E | | | | R2E | | | |
|-----------------------------------|---|------------------|---|---|---|------------------|---|---|
| | Überflutungs- volumen [m ³] | Reduktion [%] | Überlauf oder Dränage [m ³] | Überstau- volumen [m ³] | Überflutungs- volumen [m ³] | Reduktion [%] | Überlauf oder Dränage [m ³] | Überstauvolu- men [m ³] |
| Referenzmodell | 63.958 | - | - | 13.859 | 193.818 | - | - | 50.300 |
| Mulden 5 a | 50.122 | 21,6 | 21.947 | 4.422 | 183.273 | 5,4 | 74.661 | 42.116 |
| Mulden 100 a | 42.398 | 33,7 | 0 | 53 | 164.641 | 15,1 | 50.418 | 27.824 |
| Rigolen 5 a | 50.067 | 21,7 | 20.859 | 4.324 | 181.988 | 6,1 | 70.829 | 41.532 |
| Rigolen 100 a | 43.290 | 32,3 | 0 | 326 | 162.744 | 16,0 | 44.444 | 27.174 |
| Mulden-Rigolen- Elemente 5 a | 48.071 | 24,8 | 19.542 | 3.034 | 175.776 | 9,3 | 66.257 | 36.147 |
| Mulden-Rigolen- Elemente 100 a | 42.368 | 33,8 | 0 | 48 | 143.814 | 25,8 | 29.435 | 13.540 |
| Extensive Gründä- cher | 43.651 | 31,8 | 14.945 | 658 | 167.052 | 13,8 | 64.396 | 32.258 |
| Intensive Gründä- cher | 42.393 | 33,7 | 0 | 51 | 128.917 | 33,5 | 4.200 | 2.948 |
| Retentionsdächer | 42.393 | 33,7 | 0 | 51 | 128.785 | 33,6 | 0 | 2.752 |
| Zisterne | 57.442 | 10,2 | 36.250 | 9.418 | 188.681 | 2,7 | 86.247 | 46.416 |
| Retentionszisterne | 43.830 | 31,5 | 11.787 | 736 | 170.760 | 11,9 | 61.778 | 33.056 |
| Retentionszisterne gedrosselt | 46.518 | 27,3 | 35.885 | 2662 | 169.775 | 12,4 | 72.157* | 33.870 |
| Referenzmodell HOB | 64.786 | - | - | 18.717 | 195.860 | - | - | 65.024 |
| Hydr. Opt. Baum- standort | 61.972 | 4,3 | 5.982 | 16.452 | 192.817 | 1,6 | 18.536 | 61.906 |
| Referenzmodell Baumrigole | 64.757 | - | - | 21.509 | 196.316 | - | - | 73.641 |
| Baumrigole | 60.256 | 7,0 | 9.128 | 17.688 | 191.915 | 2,2 | 28.607 | 69.027 |

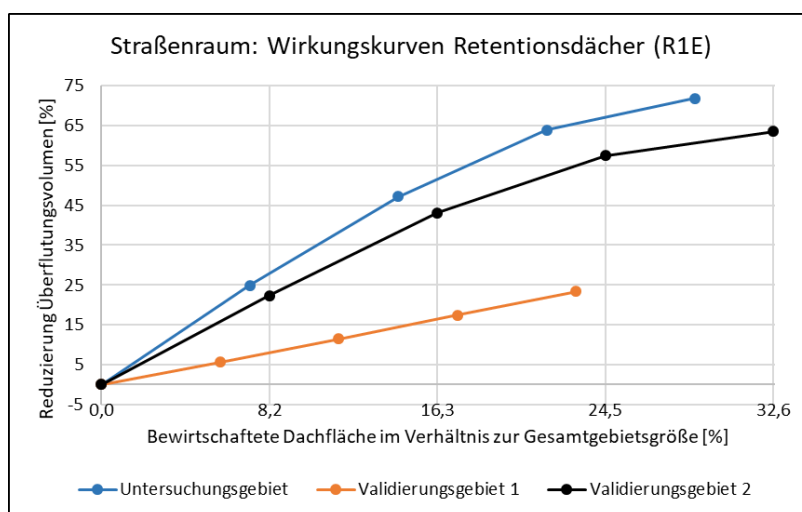
* Summe aus Überlauf und Dränageabfluss



(a) Mulden 5 a

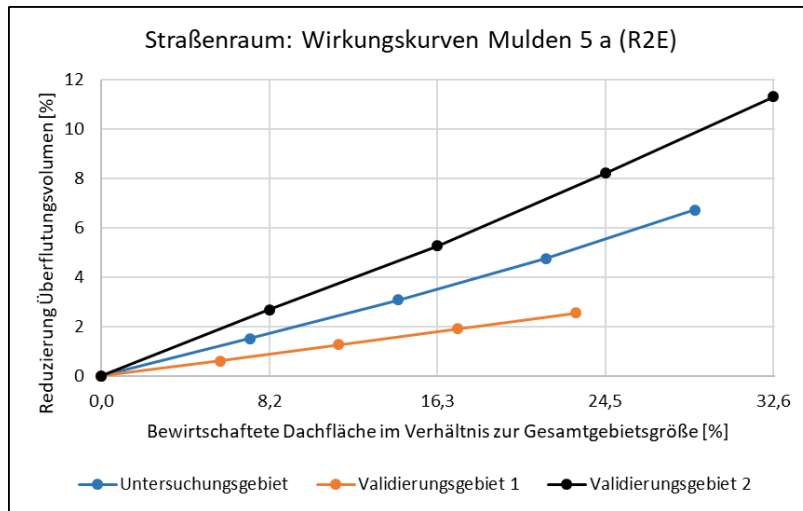


(b) Mulden 100 a

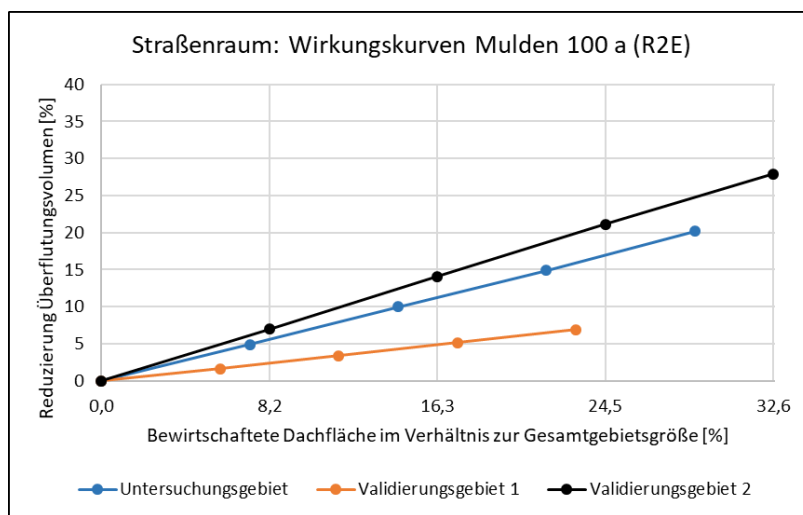


(c) Retentionsdächer

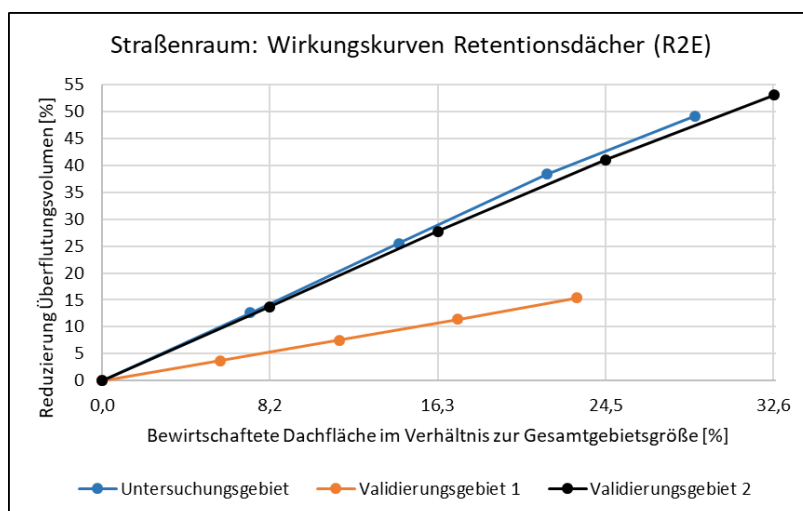
Anhang A12: Auswertung Straßenraum: Vergleich der Wirkungskurven zwischen den Modellgebieten infolge R1E



(a) Mulden 5 a



(b) Mulden 100 a



(c) Retentionsdächer

Anhang A13: Auswertung Straßenraum: Vergleich der Wirkungskurven zwischen den Modellgebieten infolge R2E

Anhang A14: Beschreibung des Excel-Tools

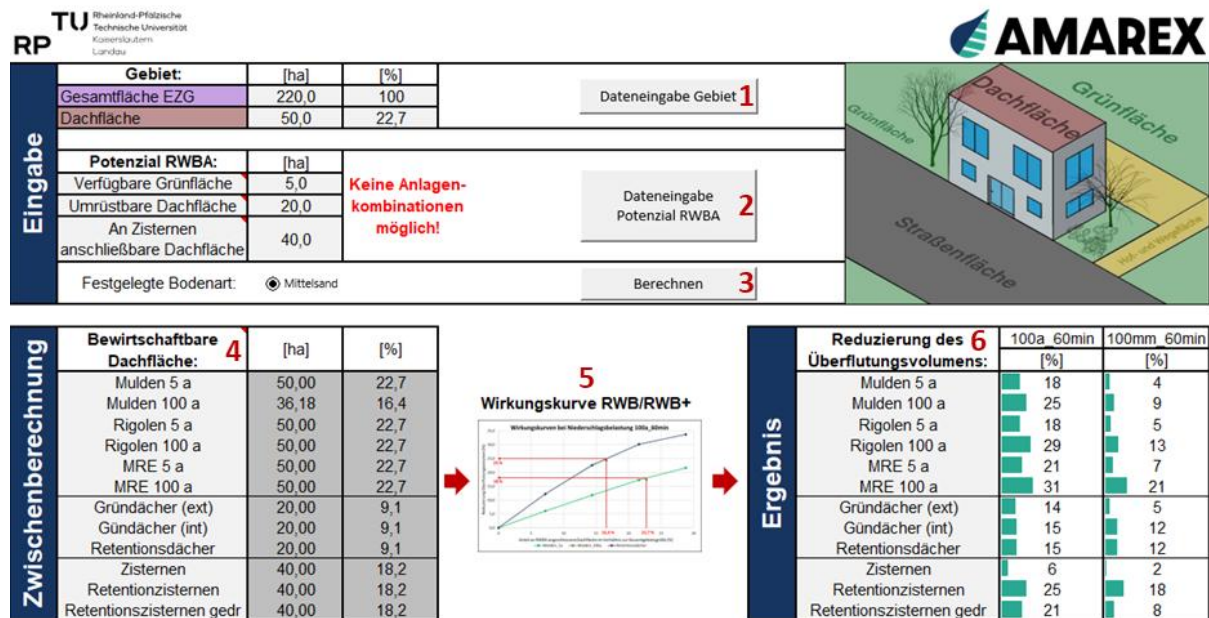


Abbildung: Grafische Benutzeroberfläche des Excel-Tools

Die gemittelten Wirkungskurven werden in ein Excel-Tool implementiert, um ihre Anwendung für Nutzer zu erleichtern: Statt der grafischen Abtragung in einem Diagramm wird die Reduzierung des Überflutungsvolumens jeweils berechnet und die Ergebnisse für alle RWBA in einer Tabelle ausgegeben. Die Abbildung zeigt die grafische Benutzeroberfläche des Excel-Tools. Die einzelnen Bereiche sind mit Zahlen von 1 - 6 markiert und werden im Folgenden erläutert:

- Dateneingabe Gebiet:** In dieser Eingabemaske trägt der Nutzer die Gesamtgebietsfläche und die gesamte Dachfläche seines EZG ein.
- Dateneingabe Potenzial RWBA:** In dieser Eingabemaske trägt der Nutzer die Flächengrößen ein, die in seinem EZG für RWBA verfügbar sind:
 - Verfügbare Grünfläche: Größe der versickerungsfähigen Grünfläche, die für Versickerungsanlagen verwendet werden kann
 - Umrüstbare Dachfläche: Größe der Dachfläche, die zu Gründächern umgerüstet werden kann
 - Anschließbare Dachfläche: Größe der Dachfläche, die an die Zisternentypen angeschlossen werden kann

Eine Kombination verschiedener Anlagen ist nicht möglich. Es kann immer nur der Effekt von einem Anlagentyp ermittelt werden.

- Berechnen:** Für die Bemessung der Versickerungsanlagen auf T = 5 a und 100 a wurde die Bodenart Mittelsand zugrunde gelegt. Auf Basis dieser Dimensionierung und der Größe der „Verfügbaren Grünfläche“ wird berechnet, wie viel Dachfläche des Gebiets durch Versickerungsanlagen bewirtschaftet werden kann.

4. **Bewirtschaftbare Dachfläche:** Die durch Versickerungsanlagen bewirtschaftbare Dachfläche wird aus der zuvor beschriebenen Berechnung übernommen. Die durch Gründächer und Zisternentypen bewirtschaftbare Dachfläche ergibt sich direkt aus der „Umrüstbaren Dachfläche“ oder „An Zisternen anschließbaren Dachfläche“.
Aus der bewirtschaftbaren Dachfläche und der Gesamtgebietsgröße wird je RWBA der Bewirtschaftungsanteil berechnet und in die zweite Spalte eingetragen.
5. **Wirkungskurven:** Im Excel-Tool sind die Stützstellen der gemittelten Wirkungskurven für die sechs Bewirtschaftungsanteile 0 %, 7 %, 14,1 %, 21,1 %, 28,1 % und 39 % hinterlegt (siehe Abbildung 5-5). Zwischen den Implementierungsstufen wird linear interpoliert. Mit dem Bewirtschaftungsanteil als Eingangsgröße wird die prozentuale Reduzierung des Überflutungsvolumens berechnet. Ein Bewirtschaftungsanteil > 39 % kann nicht berechnet werden.
6. **Ergebnisse:** Die Ergebnisse zeigen für jede Anlage die prozentuale Reduzierung des Überflutungsvolumens sowohl als Zahlenwert als auch grafisch in Form eines Balkendiagramms für die Niederschlagsbelastungen R1E und R2E.

Neben der grafischen Benutzeroberfläche verfügt das Tool über eine Reportfunktion, die auf einer Seite eine Kurzbeschreibung des Tools sowie die gewählten Eingangsgrößen und Ergebnisse zusammenfasst (siehe Anhang A15).

Überflutungsminderung durch Regenwasserbewirtschaftungsanlagen

Schätzung für ein eigenes Einzugsgebiet

Mit Hilfe des RWB+ Tools kann der Nutzer eine Schätzung der überflutungsmindernden Wirkung von Regenwasserbewirtschaftungsanlagen (RWBA) in seinem eigenen Einzugsgebiet (EZG) erhalten. Dabei ist einschränkend zu erwähnen, dass die Schätzung auf detaillierten Simulationsergebnissen aus drei flachen Berliner Untersuchungsgebieten basiert. Die Eignung des Tools für topografisch steile Gebiete wurde nicht validiert.

Als Eingangsdaten müssen die Gesamtgebietsgröße und die Größe der Dachfläche des EZG bekannt sein. Des Weiteren muss der Nutzer Angaben zum Umsetzungspotenzial von RWBA machen: Wie viel versickerungsfähige Grünfläche ist im EZG vorhanden, die für Versickerungsanlagen verwendet werden kann? Wie viel Dachfläche kann zu Gründächern umgerüstet werden oder an Zisternen angeschlossen werden? Aus dem Umsetzungspotenzial wird die bewirtschaftbare Dachfläche in Bezug auf die Gesamtfläche des EZG berechnet und als Bewirtschaftungsanteil in Prozent angegeben. Dieser Bewirtschaftungsanteil ist auf 39 % begrenzt. Bei höheren Anteilen wird der Wert N/A ausgegeben und die Dateneingabe Potenzial RWBA muss verringert werden. Es können nur Dachflächen bewirtschaftet werden und es ist keine Kombination verschiedener Anlagentypen möglich!

Als Ergebnisse erhält man eine Schätzung über die prozentuale Reduzierung des Überflutungsvolumens durch die RWBA bei einem Niederschlagsereignis mit einer Niederschlagshöhe $h_N = 48,9$ mm ($T = 100$ a) und einem Ereignis mit $h_N = 100$ mm. Zusätzlich ist der überflutungsmindernde Effekt der verschiedenen RWBA im relativen Vergleich zueinander gebietsunabhängig gültig: Mit der Anwendung des Tools kann eine erste Vorauswahl und Priorisierung von RWBA zur Starkregenvorsorge erfolgen, wobei die unterschiedliche Flächenverfügbarkeit für die Umsetzung der Anlagen berücksichtigt wird.

Eingangsdaten

| | | | |
|----------------------|--------|---------------------------------------|-------|
| Gebietsgröße: | | Potenzial RWBA: | |
| Gesamtfläche EZG | 220 ha | Verfügbare Grünfläche | 5 ha |
| Dachfläche | 50 ha | Umrüstbare Dachfläche | 40 ha |
| | | An Zisternen anschließbare Dachfläche | 40 ha |

Ergebnisse

Reduzierung des Überflutungsvolumens durch RWB/RWB+:

Niederschlagsbelastung: $h_N = 48,9$ mm, $D = 60$ min, $T = 100$ a $h_N = 100$ mm, $D = 60$ min

| | [%] | [%] |
|------------------------------|-----|-----|
| Mulden 5 a | 18 | 4 |
| Mulden 100 a | 25 | 9 |
| Rigole 5 a | 18 | 5 |
| Rigole 100 a | 29 | 13 |
| MRE 5 a | 21 | 7 |
| MRE 100 a | 31 | 21 |
| Gründächer (ext) | 25 | 9 |
| Gündächer (int) | 27 | 23 |
| Retentionsdächer | 27 | 23 |
| Zisternen | 6 | 2 |
| Retentionssysteme | 25 | 18 |
| Retentionssysteme gedrosselt | 21 | 8 |

Akademischer und beruflicher Werdegang

| | |
|----------------------|--|
| 02/2026 | Promotion am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der RPTU Kaiserslautern-Landau (<i>magna cum laude</i>) |
| 09/2025 - aktuell | Umweltplaner im Amt für Stadtplanung und Wohnen der Stadt Stuttgart, Abteilung Landschafts- und Grünordnungsplanung |
| 02/2019 - 07/2025 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der RPTU Kaiserslautern-Landau (bis 12/2022 TU Kaiserslautern) |
| 10/2016 - 12/2018 | Masterstudium Umweltschutztechnik an der Universität Stuttgart. Masterarbeit im Arbeitsbereich Siedlungsentwässerung zum Thema „Kalibrierung eines hydrologischen Niederschlag-Abfluss-Modells“ |
| 10/2013 - 09/2016 | Bachelorstudium Umweltingenieurwesen an der Technischen Universität München. Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Bauphysik zum Thema „Analyse vom Einsatz von CFD-Programmen im Bauwesen bezüglich Luftströmungen im Außenbereich“ |

Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen

bereits veröffentlicht wurden

- Band 1 **Tagungsband (2018)**
Regenwasser in urbanen Räumen
aqua urbanica trifft RegenwasserTage 2018
ISBN 978-3-95974-086-9
- Band 2 **Dissertation Hürter, Hagen (2018)**
Erarbeitung gebietsspezifischer Anwendungsempfehlungen
für bi-direktional gekoppelte 1D-2D-Überflutungsberechnungen
ISBN 978-3-95974-087-6
- Band 3 **Dissertation Baron, Silja (2018)**
Analyse von Transformationspfaden zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Abwasserentsorgung im ländlichen Raum
ISBN 978-3-95974-096-8
- Band 4 **Dissertation Scheid, Christian (2018)**
GIS-basierte Starkregen-Risikoanalyse unter besonderer Berücksichtigung von Datenerfordernissen und methodischer Aussagefähigkeit
ISBN 978-3-95974-102-6
- Band 5 **Dissertation Schäfer, Michael (2019)**
Ein methodischer Ansatz zur Bereitstellung energetischer Flexibilität durch einen anpassungsfähigen Kläranlagenbetrieb
ISBN 978-3-95974-108-8
- Band 6 **Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt (2019)**
Siedlungswasserwirtschaft 'from K'Town to KOSMOS'
ISBN 978-3-95974-104-0
- Band 7 **Dissertation Bachmann-Machnik, Anna (2020)**
Optimierung des Betriebs von Kanalnetzen im Mischsystem auf Basis von Online-Messdaten
ISBN 978-3-95974-128-6
- Band 8 **Dissertation Gelhardt, Laura (2020)**
Charakterisierung von Feststoffen auf urbanen Verkehrsflächen als potenzielle Schadstoffträger im Niederschlagsabfluss -
Entwicklung einer Methode zur Messung der Sinkgeschwindigkeit und absetzrelevanter Kenngrößen
ISBN 978-3-95974-139-2
- Band 9 **Dissertation Vergara Araya, Monica (2023)**
Development and Evaluation of Strategies for Improving Norm Compliance for Nitrogen Compounds and Reducing Energy Consumption in Wastewater Treatment via Dynamic Simulation
ISBN 978-3-95974-194-1

-
- Band 10 **Dissertation Uhrig, Thomas (2023)**
Eignung von kommunalen und industriellen Abwasserströmen für die PHA-Produktion und Ansätze zum Up-Scaling des Prozesses
ISBN 978-3-95974-199-6
- Band 11 **Dissertation Baum, Philipp (2023)**
Organic Micropollutants, Metals and Total Suspended Solids in Urban Stormwater Runoff from an Industrial Area: Evaluation of Occurrence, Behaviour and Removal Efficiency
ISBN 978-3-95974-206-1
- Band 12 **Dissertation Gottardo Morandi, Carlo (2023)**
Anpassung des Bodenfilterverfahrens zur nutzungsorientierten Grauwasseraufbereitung und Auswirkungen der Grauwasserseparation auf zentrale Abwasserbehandlungsanlagen
ISBN 978-3-95974-208-5
- Band 13 **Dissertation Abusafia, Attaallah Y. A. (2024)**
Developing Monitoring Strategies for Quantifying and Examining the Fate of Microplastic Emissions in Urban Wastewater Drainage Systems
ISBN 978-3-95974-223-8
- Band 14 **Dissertation Dilly, Timo Christopher (2025)**
A Macro Level Optimization Model for Sustainable Water Management
A holistic decision-making tool for planning water supply, urban drainage, wastewater treatment and water reuse using (mixed-integer) linear programming
ISBN 978-3-95974-247-4
- Band 15 **Dissertation Zimmer, Julia (2025)**
Dynamik der mikrobiellen Mischbiozönose und der PHA-Produktion aus Restströmen unter variierenden Betriebsstrategien
ISBN 978-3-95974-251-1
- Band 16 **Dissertation Ye, Florian (2025)**
Produktion von Polyhydroxyalkanoaten aus nährstoffreichen Vakuumtoilettenabwässern und Küchenabfällen
ISBN 978-3-95974-254-2
- Band 17 **Dissertation Neumann, Jonas (2026)**
Modelltechnische Untersuchungen zum Effekt von dezentralen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen für die Starkregenvorsorge
ISBN 978-3-95974-260-3

wasser infrastruktur ressourcen



Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau

Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Zentrum für Innovative AbWassertechnologien

Paul-Ehrlich-Straße
67663 Kaiserslautern
☎ +49 631 205-3685
<https://bauing.rptu.de/ags/wir>



ISSN: 2570-1460 | ISBN: 978-3-95974-260-3