



Futic Emin, BSc

**Modellbasierte Evaluierung des wassersensiblen
Umbaus einer peri-urbanen Straße**

Umsetzungsgebiet: PeriSponge Feldbach

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur/In

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Infrastruktur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer/In:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Muschalla

Mitbetreuende(r) Assistent(en):

Albert Wilhelm König, M.Eng.

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, Mai 2024

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen aufrichtigen Dank an all jene richten, die mich während der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt und ermutigt haben.

Zuallererst möchte ich Herrn Prof. Dr. Dirk Muschalla meinen Dank aussprechen, der meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat.

Ebenfalls gebührt Albert König mein Dank für seine hilfreichen Anregungen und konstruktive Kritik während der Entstehung dieser Arbeit sowie für sein Korrekturlesen meiner Masterarbeit.

Ein besonderer Dank geht auch an Gabriel, meinem treuen Studienkollegen und unersetzlichen Freund, der mich bis zum Abschluss meines Studiums unterstützt hat.

Ebenso möchte ich meinen Freunden danken, insbesondere Vanesa, die mir stets mit Rat und emotionaler Unterstützung zur Seite gestanden haben.

In dieser Masterarbeit möchte ich mich weiters herzlich bei der Kirchdorfer Fertigteilverwaltung GmbH für die tolle und hilfreiche Unterstützung bedanken.

Zum Abschluss möchte ich meinen Eltern und Geschwistern meinen tiefsten Dank aussprechen, die mir durch ihre Unterstützung mein Studium ermöglicht haben, immer ein offenes Ohr für mich hatten und mir ermöglicht haben, meinen Weg zu gehen.

Ohne das Vertrauen, die Unterstützung und die Liebe meiner Familie und Freunde wäre diese Masterarbeit nicht möglich gewesen. Ich danke euch allen von ganzem Herzen für eure bedingungslose Unterstützung und eure Ermutigung.

Kurzfassung

Diese Masterarbeit widmet sich der Evaluierung der Wirksamkeit von blau-grünen Infrastrukturmaßnahmen zur Bewältigung wasserwirtschaftlicher Herausforderungen im Rahmen des "PeriSponge"-Pilotprojektes. Der Fokus liegt dabei auf der Oedter Straße in Feldbach, wo verschiedene Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur zur Regenwasserretention, Verdunstung und Versickerung umgesetzt werden sollen. Mithilfe von hydrologischen Modellen, erstellt mit Software wie EPA SWMM und PC-SWMM, werden die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf den Niederschlagsabfluss untersucht.

Um den wasserwirtschaftlichen Herausforderungen zu begegnen, die durch die steigende Versiegelung von Flächen und die Auswirkungen des Klimawandels verstärkt werden, wurden Modelle sowohl für die aktuelle als auch für die mit BGI-Maßnahmen implementierte Situation erstellt und verglichen. Nach der Kalibrierung und Validierung basierend auf realen Daten erfolgten zehnjährige Langzeitsimulationen, gefolgt von einem detaillierten Vergleich der hydrologischen Modelle. Die Ergebnisse zeigen, dass die Einführung von blau-grüner Infrastruktur zu einer deutlichen Reduzierung des Oberflächenabflusses und einer Verbesserung der lokalen Wasserrückhaltung, Versickerung und Verdunstung führen kann.

Die Implementierung von blau-grüner Infrastruktur führte zu bedeutenden Verbesserungen in der Abflusscharakteristik. Die Reduzierung von Abflussspitzen um 10% bis 30% sowie die Minimierung des Gesamtvolumens an Abflusswasser, das in den Vorfluter gelangen würde, unterstreichen die Effektivität dieser Maßnahmen.

Abstract

This master's thesis focuses on evaluating the effectiveness of blue-green infrastructure measures in addressing water management challenges within the "Per-iSponge" pilot project. The study centers on Oedter Straße in Feldbach, where various blue-green infrastructure measures for rainwater retention, evaporation, and infiltration are being implemented. Using hydrological models created with software such as EPA SWMM and PC-SWMM, the study examines the impacts of these measures on rainfall runoff. Increasing land use and sealing, compounded by the effects of climate change, pose significant challenges in managing runoff from sealed surfaces.

To address these water management challenges, models were developed and compared for both the current situation and the situation implemented with blue-green infrastructure measures. Following calibration and validation based on real data, ten-year long-term simulations were conducted, followed by a detailed comparison of the hydrological models. The results indicate that the introduction of blue-green infrastructure can lead to a significant reduction in surface runoff and an improvement in local water retention, infiltration, and evaporation.

The implementation of blue-green infrastructure has resulted in significant improvements in runoff characteristics. The reduction in peak flows by 10% to 30% and the minimization of the total volume of runoff water entering the receiving water bodies underscore the effectiveness of these measures.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
1.2	Motivation	2
2	Grundlagen	3
2.1	Umwelteinflüsse	3
2.2	Wasserwirtschaftliche Herausforderungen der Regenwasserbewirtschaftung	6
2.2.1	Verdunstung	6
2.2.2	Reduzierung Abflussspitze	6
2.2.3	Grundwasserneubildung	7
2.2.4	Oberflächenabfluss – qualitative Abflussparameter	7
2.3	Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur	9
2.3.1	Allgemeine Beschreibung	9
2.3.2	Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur im EZG Feldbach	11
2.3.3	Übersicht der BGI-Maßnahmen im EZG Feldbach	16
3	Methodik	18
3.1	Herangehensweise und Modellaufbau	18
3.2	Eingrenzung des Einzugsgebietes Feldbach	18
3.2.1	Lage und Gelände	20
3.2.2	Problematik im Einzugsgebiet Feldbach	21
3.3	Software	22
3.3.1	EPA SWMM und PC-SWMM	22
3.3.2	QGIS	22
3.4	Datengrundlage	22
3.4.1	Kanaldaten	23
3.4.2	Durchflussdaten	23
3.4.3	Niederschlagsdaten	24
3.4.4	Bodenparameter	30
3.4.5	Verdunstung	32
3.5	Trockenwetterabfluss	33

3.6	Simulationseinstellungen	34
3.7	Kalibrierung und Validierung	34
3.7.1	Kalibrierung	36
3.7.2	Validierung	40
3.8	Blau-grüne Infrastruktur Maßnahmen	40
3.8.1	Kennzeichnung der BGI-Maßnahmen und Maßnahmenpakete	40
3.8.2	Parameterwahl der BGI-Maßnahmen	44
3.9	Langzeitsimulation	45
4	Ergebnisse und Diskussion	47
4.1	Modellkalibrierung	47
4.1.1	Kalibrierung - Gesamtabfluss	48
4.1.2	Kalibrierung - durchschnittlicher Abfluss	49
4.1.3	Kalibrierung - Abflussspitze	50
4.2	Modellvalidierung	51
4.2.1	Validierung - Gesamtabfluss	51
4.2.2	Validierung - durchschnittlicher Abfluss	52
4.2.3	Validierung - Abflussspitze	52
4.3	Auswertungen des gesamten Einzugsgebietes	53
4.3.1	Auswertung des gesamten Abflusses am Kanalauslass beim Oedterbach	55
4.3.2	Auswertung aller Schwerpunktbereiche des gesamten Einzugsgebietes	56
4.3.3	Auswertung der Abflüsse in Kanälen des gesamten Einzugsgebietes	58
4.3.4	Auswertung der Abflussspitzen am Auslass des gesamten Einzugsgebietes	60
4.4	Auswertung der wasserwirtschaftlichen Schwerpunkte aller BGI- Maßnahmen	61
4.4.1	Leistungsauswertung der Abflüsse aller BGI-Maßnahmen	65
4.4.2	Leistungsauswertung der Verdunstung aller BGI- Maßnahmen	67
4.4.3	Leistungsauswertung der Versickerung aller BGI- Maßnahmen	68

4.5	Auswertungen der Teilfläche „Friedhof“	69
4.5.1	Kanalabschnitt FH-KS-1	69
4.6	Auswertungen der Teilfläche „Kelly“	77
4.6.1	Kanalabschnitt KLY-KS-1	77
4.7	Auswertungen der Teilfläche „Gemeindebau“	80
4.7.1	Kanalabschnitt GB-KS-1	81
4.7.2	Kanalabschnitt GB-KS-4	83
4.7.3	Kanalabschnitt GB-KS-3 und GB-KS-2	85
4.8	Auswertungen der Teilfläche „Oedterbach“	89
4.8.1	Kanalabschnitt OB-KS-1	89
4.8.2	Kanalabschnitt OB-KS-2	93
5	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen, und Ausblick.....	95
5.1	Zusammenfassung.....	95
5.2	Schlussfolgerungen.....	95
5.3	Ausblick.....	98
	Literaturverzeichnis	100

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Die Darstellung des Niederschlagsprozesses im Vergleich zwischen versiegelten Flächen und natürlichen, unversiegelten Böden. (Haag, 2024)	4
Abbildung 2-2: Abflussbeschleunigung durch Kanalisierung (Sieker, 2024a).....	5
Abbildung 2-3: Verschmutzungsquellen Regenwasserabflüsse (Sieker, 2024b)	8
Abbildung 2-4: Darstellung lebenshemmender Faktoren für Pflanzen in Städten (Climateways, 2023).....	10
Abbildung 2-5: Schematisches Konzept einer blau-grünen Infrastruktur in städtischen Gebieten (bgmr Landschaftsarchitekten, 2023).....	11
Abbildung 2-6: Darstellung des Aufbaus für vegetative Mulden (PCSWMM Support, 2024c)	12
Abbildung 2-7: Darstellung des Aufbaus für versickerungsfähige Parkplätze (PCSWMM Support, 2024c).....	13
Abbildung 2-8: Ausführung eines sickerfähigen Parkplatzes	14
Abbildung 2-9: Darstellung des Sickermuldenaufbaus (PCSWMM Support, 2024c).....	14
Abbildung 2-10: Darstellung des Regengartenaufbaus (PCSWMM Support, 2024c)	15
Abbildung 2-11: Ausschnitt des Einzugsgebietes Feldbach mit Übersicht aller blau-grünen Infrastrukturmaßnahmen sowie deren Unterscheidung.	16
Abbildung 3-1: Eingrenzung des Einzugsgebietes Feldbach basierend auf einem Digitalen Geländemodell. (Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, 2024)	19
Abbildung 3-2: Darstellung der einzelnen Teileinzugsflächen, die das gesamte Einzugsgebiet zusammenfassen.....	20
Abbildung 3-3: Darstellung des EZG Feldbach und Höhe des EZG in Meter ü. Adria	21
Abbildung 3-4: Darstellung des Standorts der Messstation im Einzugsgebiet Feldbach	24
Abbildung 3-5: Darstellung der Standorte der Messstationen für Niederschlagsdaten im Einzugsgebiet von Feldbach.	26
Abbildung 3-6: Darstellung der Stellen, an denen die Infiltrationsraten gemessen wurden.	31

Abbildung 3-7: Darstellung der BGI-Maßnahmen im EZG Feldbach aller Maßnahmenpakete sowie der dazugehörigen Teilflächen der einzelnen Maßnahmenpakete.....	43
Abbildung 3-8: Gesamtniederschlagssummen im Bereich Feldbach für das Ereignis am 22.08.2020 (Schatzl, 2024).....	46
Abbildung 3-9: Niederschlagsverhalten an der Station Feldbach am 22.08.2020 (Schatzl, 2024).	46
Abbildung 4-1: Darstellung ausgewählter Ereignisse für die Kalibrierung des Gesamtabflusses im Schacht „Messstation“ in Kubikmeter [m ³].....	48
Abbildung 4-2: Darstellung ausgewählter Ereignisse zur Kalibrierung des durchschnittlichen Abflusses im Schacht „Messstation“ in Liter pro Sekunde (l/s).....	49
Abbildung 4-3: Darstellung ausgewählter Ereignisse für die Kalibrierung der Abflussspitze im Schacht „Messstation“ in Liter pro Sekunde [l/s]	50
Abbildung 4-4: Darstellung ausgewählter Ereignisse für die Validierung des Gesamtabflusses im Schacht „Messstation“ in Kubikmeter [m ³].....	51
Abbildung 4-5: Darstellung ausgewählter Ereignisse zur Validierung des durchschnittlichen Abflusses im Schacht „Messstation“ in Liter pro Sekunde (l/s).....	52
Abbildung 4-6: Darstellung ausgewählter Ereignisse für die Validierung der Abflussspitze im Schacht „Messstation“ in Liter pro Sekunde [l/s]	53
Abbildung 4-7: Übersicht Gesamtabfluss am Kanalauslass vor dem Oedterbach.....	55
Abbildung 4-8: Darstellung des Gesamtberichtes der Schwerpunktbereiche Verdunstung, Versickerung und Oberflächenabfluss.	56
Abbildung 4-9: Auswertung und Vergleich der Kanäle zwischen dem Modell des IST-Zustandes und Modell mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur.....	58
Abbildung 4-10: Vergleich der Abflussspitzen zwischen dem Modell des IST-Zustandes und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur in Liter pro Sekunde [l/s].....	60
Abbildung 4-11: Darstellung aller BGI-Maßnahmen und dessen Größe, Zuflüsse, Abflüsse, Verdunstung und Versickerung in Kubikmeter [m ³ Wasser]	63
Abbildung 4-12: Übersicht über die Leistung der einzelnen BGI-Maßnahmen in Bezug auf Abflüsse [l/m ²].....	65
Abbildung 4-13: Übersicht über die Leistung der einzelnen BGI-Maßnahmen in Bezug auf Verdunstung [l/m ²]	67

Abbildung 4-14: Übersicht über die Leistung der einzelnen BGI-Maßnahmen in Bezug auf Versickerung [l/m ²]	68
Abbildung 4-15: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt FH-KS-1	69
Abbildung 4-16: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SfP-3 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Sickerfähiger Parkplatz mit 100m ² (Friedhof)	70
Abbildung 4-17: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SM-4 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 247m ² (Friedhof)	71
Abbildung 4-18: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SfP-2 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Sickerfähiger Parkplatz mit 50m ² (Friedhof)	72
Abbildung 4-19: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SM-3 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 23m ² (Friedhof)	73
Abbildung 4-20: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SfP-1 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Sickerfähiger Parkplatz mit 50m ² (Friedhof)	74
Abbildung 4-21: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SM-2 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Sickermulde mit 12.5m ² (Friedhof)	75
Abbildung 4-22: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SM-1 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 196m ² (Friedhof)	76
Abbildung 4-23: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt KLY-KS-1	77
Abbildung 4-24: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet KLY-SM-2 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 145m ² (Kelly).....	78

Abbildung 4-25: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet KLY-SM-1 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 103m ² (Kelly)	79
Abbildung 4-26: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt GB-KS-1	81
Abbildung 4-27: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet GB-SM-4 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 38m ² (Gemeindebau)	82
Abbildung 4-28: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt GB-KS-4	83
Abbildung 4-29: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet GB-SM-3 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 60m ² (Gemeindebau)	84
Abbildung 4-30: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt GB-KS-3	85
Abbildung 4-31: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt GB-KS-2	86
Abbildung 4-32: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet GB-SM-1 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 122m ² (Gemeindebau)	87
Abbildung 4-33: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet GB-SM-2 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 122m ² (Gemeindebau)	88
Abbildung 4-34: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt OB-KS-1	89
Abbildung 4-35: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet OB-RM-1 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Regengarten mit 450m ²	90

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-36: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet OB-VM-1 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Vegetative Mulde mit 25m ²	91
Abbildung 4-37: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet OB-VM-2 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Vegetative Mulde mit 25m ²	92
Abbildung 4-38: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt OB-KS-2	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Auflistung aller Niederschlagsereignisse, die im relevanten Zeitraum vom 31. Mai 2023 bis zum 31. Juli 2023 aufgetreten sind. Zudem Darstellung der Kategorizuweisungen für jedes einzelne Ereignis (Spalte 4).....	27
Tabelle 3-2:	Ausschlussgründe der Regenereignisse	28
Tabelle 3-3:	Kategorisierung und Verteilung der Niederschlagsereignisse für Kalibrierung und Validierung im Einzugsgebiet von Feldbach.....	30
Tabelle 3-4:	Auswertung der Infiltrationsraten an den gemessenen Stellen.	32
Tabelle 3-5:	Ausschnitt der zehnjährigen Klimadaten für das EZG Feldbach, die für die Langzeitsimulation verwendet wurden	33
Tabelle 3-6:	Gewählte Einstellungen für die Simulation	34
Tabelle 3-7:	Tabelle der möglichen Modellunsicherheiten für die Kalibrierung mit dem SRTC-Tool.....	38
Tabelle 3-8:	Übersicht der Basiswerte für die jeweiligen Parameterschwerpunkte „Teileinzugsgebiet“ und „Kanalrohr“	39
Tabelle 3-9:	Übersicht der Parameterwerte nach der Kalibrierung für die jeweiligen Parameterschwerpunkte „Teileinzugsgebiet“ und „Kanalrohr“	40
Tabelle 3-10:	Übersicht der Bodenschichten, die verwendet werden, um verschiedene Arten von Maßnahmen der BGI zu modellieren (Rossmann, 2015, mod.).	44
Tabelle 3-11:	Übersicht Parameterwahl der Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (Yang et al. 2023; McCuen et al. 2002; LID control editor 2023; Rawls et al. 1983; James et al. 2010)	45
Tabelle 4-1:	Auswertung der Fehlermaße	47
Tabelle 4-2:	Verhältnis angeschlossene Nettofläche zur Größe der BGI-Maßnahme.....	64

Abkürzungsverzeichnis

MA	Masterarbeit
EZG	Einzugsgebiet
OEWAV	Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
TEZG	Teileinzugsgebiet
N	Rauigkeit nach Manning
Dperv	engl. Depression storage pervious – Oberflächenspeicher für durchlässige Flächen
Dimperv	engl. Depression storage impervious – Oberflächenspeicher für versiegelte Flächen
BGI	Blau-grüne Infrastruktur
Bzw	Beziehungsweise

1 Einleitung

Diese Masterarbeit ist im Rahmen des Forschungsprojektes „PeriSponge“ entstanden, bei dem ein wassersensibler Umbau eines Straßenzugs als Pilotprojekt geplant ist. Das Einzugsgebiet dieses Projektes befindet sich entlang der Oedter Straße in Feldbach, einer Stadt in der Südoststeiermark. In der Masterarbeit soll die Wirksamkeit ausgewählter Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur zur Bewältigung von wasserwirtschaftlichen Herausforderungen untersucht werden.

Diese Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (BGI) sind speziell umgebaute Flächen entlang des Einzugsgebietes, die mehrere Funktionen erfüllen. Dies umfasst Methoden wie Versickerung, Retention und Verdunstung, um eine effektive Bewirtschaftung von Regenwasser zu schaffen und den natürlichen Wasserkreislauf zu unterstützen. Zu diesem Zweck werden die BGI-Maßnahmen implementiert und ihr Einfluss auf das Niederschlagsabflussverhalten des Projektgebiets in Feldbach untersucht. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wird anhand der Reduzierung quantitativer Abflussparameter wie Abflussspitzen und Abflussvolumen bewertet. Bei Verringerung des zurückbleibenden Volumens im Gebiet soll die Verdunstung und Versickerung gefördert und der Oberflächenabfluss minimiert werden. Qualitative Verbesserungen des Abflusses, wie die Reduktion von Nährstoffen oder Schwermetallen, werden in dieser Arbeit nicht im Detail behandelt.

Die für das Projekt implementierten Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur, die vielen Umwelteinflüsse sowie die unterschiedlichen wasserwirtschaftlichen Herausforderungen werden nachfolgend im Kapitel 2 beschrieben.

Kapitel 3 beschreibt die Methodik und die Lösungsansätze dieser Arbeit. Angefangen bei der Beschreibung der angewandten Methodik bis hin zur Modellbildung, Kalibrierung und Validierung, werden die Schritte, die zur Erreichung der Zielsetzung erforderlich sind, erläutert. Es wird dabei genauer auf das Einzugsgebiet Feldbach und die eingesetzte Software eingegangen.

Die Ergebnisse und die Diskussion werden dann im Kapitel 4 erläutert, ehe es in Kapitel 5 zu der Zusammenfassung, zur Schlussfolgerung und zum Ausblick geht.

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Um Aussagen über die geplanten Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (BGI) treffen zu können, wird zunächst ein hydrologisches Modell des Einzugsgebietes (EZG) in Feldbach erstellt. Dieses Modell soll die IST-Situation möglichst realitätsgetreu simulieren und wird auf Basis verfügbarer Daten und Informationen kalibriert und validiert. Dabei liegt der Fokus der Kalibrierung auf der Abstimmung der hydrologischen Prozesse, insbesondere hinsichtlich quantitativer Abflussparameter wie dem Abflussvolumen und der Abflussspitze.

Anhand dieses kalibrierten IST-Modells wird ein weiteres Modell aufgesetzt, das die Integration der geplanten BGI-Maßnahmen berücksichtigt. Langzeitsimulationen werden durchgeführt, um verschiedene Szenarien mit und ohne die implementierten BGI-Maßnahmen zu vergleichen.

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, die Effektivität der BGI-Maßnahmen zur Bewältigung von wasserwirtschaftlichen Herausforderungen im EZG Feldbach zu bewerten. Durch die verstärkte Rückhaltung von Wasser im Gebiet soll das Kanalnetz entlastet und die Abflussspitzen minimiert werden. Die richtige Anordnung und bauliche Ausführung der BGI-Maßnahmen zielen darauf ab, die Versickerung (vgl. 2.2.3) und Verdunstung (2.2.1) zu fördern, den Oberflächenabfluss (2.2.4) zu verringern und damit auch die Verschmutzung des Oberflächenwassers zu reduzieren. Das Oberflächenwasser fließt in die verschiedenen BGI-Maßnahmen, wo es gereinigt werden kann, bevor es gegebenenfalls in den Kanal und anschließend in den Vorfluter gelangt. Qualitative Verbesserungen des Abflusses und die Reduzierung der Verschmutzung des Oberflächenwassers werden in dieser Masterarbeit jedoch nicht im Detail betrachtet.

1.2 Motivation

Das "Perisponge"-Projekt dient als Pilotprojekt für die Erprobung der Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur, die dazu beitragen, wasserwirtschaftliche Herausforderungen zu bewältigen. Durch geplante Umbaumaßnahmen sollen Infiltrations-, Retentions- und Verdunstungseffekte gefördert werden, um den Einfluss auf das Entwässerungssystem und letztendlich auf die umliegenden Gewässer zu minimieren. Die Möglichkeit, mein erlerntes Wissen aus verschiedenen Lehrveranstaltungen der Technischen Universität Graz in einem realen Projekt anzuwenden, hat mich dazu inspiriert, mich dem Projekt "PeriSponge" zu widmen. Es motiviert mich einen aktiven Beitrag zu diesem bedeutsamen Projekt zu leisten, um nicht nur mein Verständnis für Niederschlagsabflussprozesse zu vertiefen, sondern auch aktiv zur Umweltschonung beizutragen.

2 Grundlagen

Die kommenden Unterkapitel sollen einen Einblick in die unterschiedlichen Umwelteinflüsse geben, die implementierten Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur erläutern und die wasserwirtschaftlichen Herausforderungen beschreiben.

2.1 Umwelteinflüsse

Die zunehmende Flächeninanspruchnahme und die damit verbundene Oberflächenversiegelung stellen bedeutende Herausforderungen für die österreichische Umwelt dar. Laut einem Bericht des Umweltbundesamtes Österreich betrug der Dreijahresmittelwert der Flächeninanspruchnahme im Jahr 2021 41 km². Dies entspricht einer täglichen Umwandlung von etwa 11,3 Hektar in verschiedene Flächentypen, darunter Siedlungs- und Verkehrsflächen, Bereiche für Freizeitnutzung, Deponien, Bergbau, Industrieanlagen und intensiv genutzte Landflächen (Enzinger, 2022b).

Die Versiegelung von Oberflächen tritt auf, wenn natürlicher Boden durch luft- und wasserdichte Beläge abgedeckt wird, wodurch Regenwasser nicht mehr in den Boden eindringen oder versickern kann. Diese Versiegelungen haben ökologisch bedenkliche Folgen, wie die Reduzierung der Bodenfruchtbarkeit, die Verhinderung der Schadstofffilterung aus der Luft und eine Erwärmung des lokalen Klimas durch eingeschränkte Verdunstung und Pflanzenwachstum (ErWiN, 2022).

In der folgenden Abbildung 2-1 werden der Niederschlagsabfluss und die Auswirkungen von versiegelten Flächen im Vergleich mit naturbelassenen Flächen gezeigt. Bei naturbelassenen Flächen versickert ein Teil in den Boden und der andere Teil kann mit der Zeit verdunsten. Bei versiegelten Flächen kann nur ein kleiner Teil versickern und auch nur der Teil verdunsten, der auf der Oberfläche liegen bleibt. Der größte Teil des Niederschlags wandert als Oberflächenabfluss in Richtung von Sammelschächten, Wasserläufen oder Klärwerken, Mulden oder sonstigen Flächen, die sich in unmittelbarer Nähe befinden (Haag, 2024).

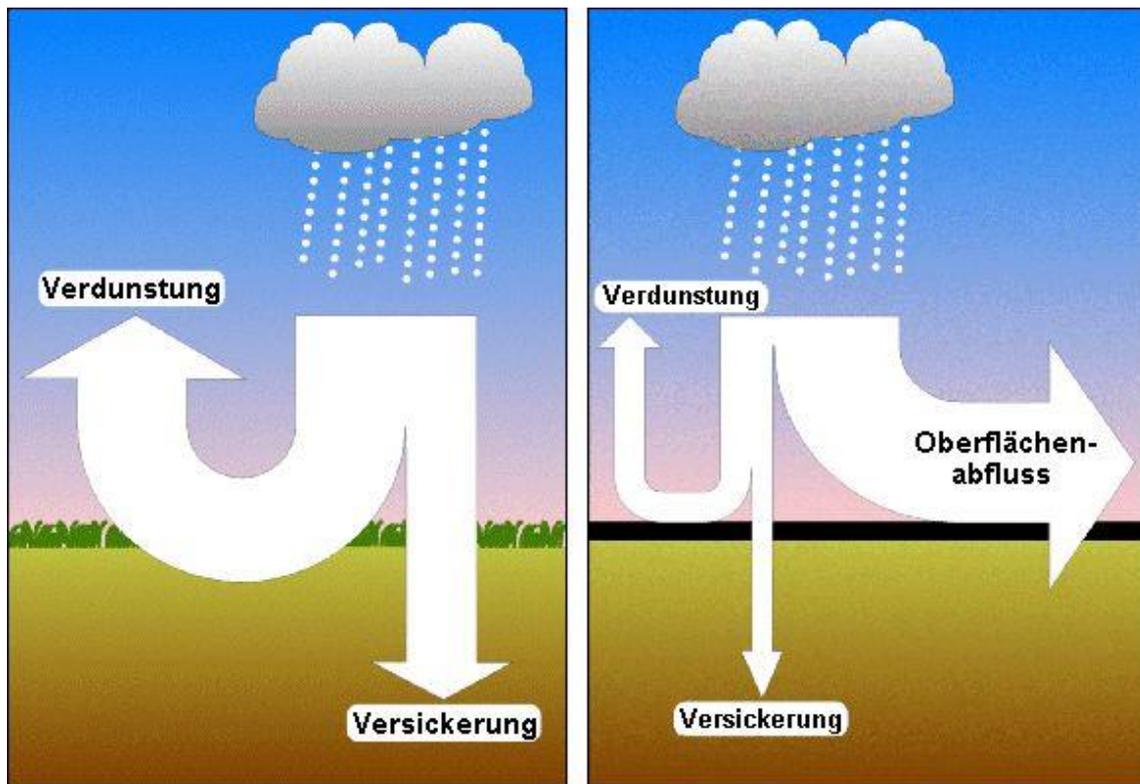


Abbildung 2-1: Die Darstellung des Niederschlagsprozesses im Vergleich zwischen versiegelten Flächen und natürlichen, unversiegelten Böden. (Haag, 2024)

Was oft übersehen wird, ist die Verbindung zwischen der raschen Ableitung von Abflüssen in Kanalsystemen und der dadurch verursachten Zunahme der Abflussspitzen in den Gewässern. Während Versiegelung im Allgemeinen zu einem größeren Abflussvolumen führt, beschleunigt die Ableitung den Abfluss und führt daher in der Regel zu steileren Anstiegen und höheren Abflussspitzen. Dies ist der Abbildung 2-2 zu entnehmen. Dieser Effekt ist komplex und hängt stark von den örtlichen Bedingungen wie Fließzeiten, Form des Einzugsgebietes, Lage der Siedlungsgebiete, etc., ab. (Sieker, 2024a).

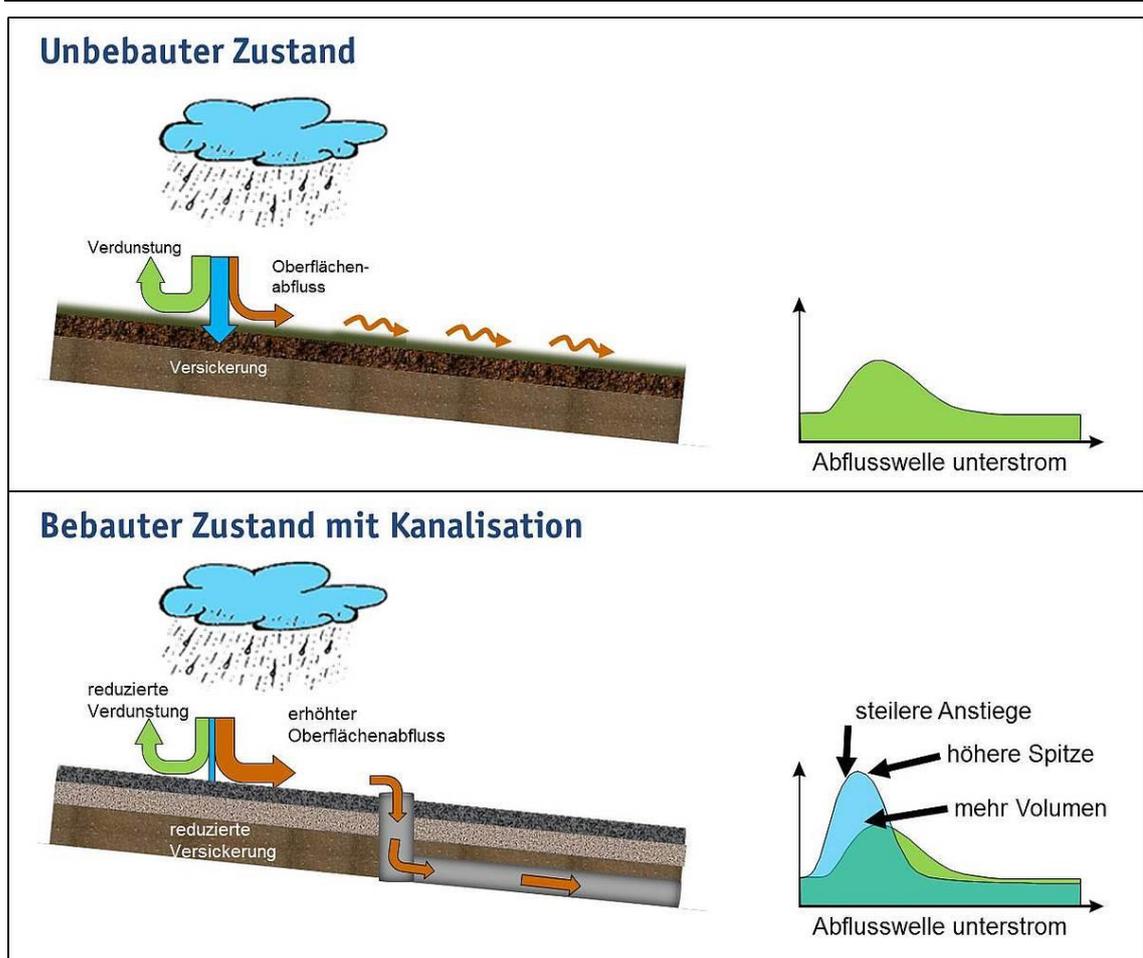


Abbildung 2-2: Abflussbeschleunigung durch Kanalisierung (Sieker, 2024a)

Die wachsende Flächeninanspruchnahme und die damit einhergehende Versiegelung der Oberflächen haben auch direkte Verbindungen zum Klimawandel. Der neue IPCC-Klimabericht bestätigt den maßgeblichen Einfluss des Menschen auf das Klimasystem und prognostiziert zukünftige Klimaentwicklungen. Der Bericht zeigt, dass der Mensch verantwortlich ist für den Anstieg globaler Temperaturen, die Zunahme von Treibhausgasen und drastische Veränderungen in Atmosphäre, Ozeanen und Polarregionen (Puttfarcken, 2023)

Diese Aspekte des Klimawandels wirken sich wiederum negativ auf die Situation der Urbanisierung und die damit verbundene Versiegelung von Flächen aus, insbesondere im Hinblick auf die Problematik des Niederschlagsabflusses in urbanen Räumen.

2.2 Wasserwirtschaftliche Herausforderungen der Regenwasserbewirtschaftung

Niederschlagswasser von Gebäuden, Straßen und anderen versiegelten Flächen wird weitestgehend abgeleitet, was den natürlichen Wasserhaushalt verändert und die Auswirkungen von Regen- und Trockenperioden verstärkt, die bereits durch den anthropogenen Klimawandel beeinflusst sind. Wie bereits erwähnt, bringt der Abfluss von Niederschlagswasser wasserwirtschaftliche Herausforderungen mit sich. Daher ist es wichtig, die wasserwirtschaftlichen Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Regenwasserabfluss zu verstehen und geeignete Maßnahmen zur Bewältigung dieser Herausforderungen zu entwickeln (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, 2018).

Die Aufgabe des nachhaltigen Regenwassermanagements besteht zumeist darin, das natürliche Wasserregime weitgehend zu erhalten oder wiederherzustellen. Es umfasst unter anderem die Erhöhung der Verdunstungsleistung zur Verbesserung des städtischen Kleinklimas (vgl. 2.2.1), den Schutz der Infrastruktur vor Schäden durch Regenereignisse (vgl. 2.2.2), die Förderung der Grundwasserneubildung (vgl. 2.2.3) und durch Filtration die Verbesserung der Qualität des abfließenden Regenwassers. Zusätzlich zielt es auf die Vermeidung von ökologischen und morphologischen Schäden in den aufnehmenden Gewässern, wie den Vorfluter Oedterbach im Einzugsgebiet, durch hydraulische und stoffliche Überlastung ab (vgl. 2.2.4) (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, 2018).

2.2.1 Verdunstung

Unter diesem Punkt wird die potenzielle Verdunstung von offenen Wasser- oder Vegetationsflächen und ihr Einfluss auf das Stadtklima zusammengefasst. Bewachsene und feuchte Speicher wirken im Innenstadtbereich dem Wärmeinsellekt entgegen. Die stadt-klimatische Wirkung ist am größten, wenn Bäume dort verdunsten oder Schatten spenden, wo sich die Menschen aufhalten (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, 2018).

2.2.2 Reduzierung Abflussspitze

Die Reduzierung des Spitzenabflusses bezeichnet die Verringerung des höchsten Volumenstroms während eines Regenereignisses. Dies dient nicht dem Hochwasserschutz, sondern dem Schutz der Infrastruktur vor Schäden durch starke Regenfälle. Obwohl die Abflussspitze nur kurzzeitig auftritt, kann sie schwerwiegende Schäden im Kanal verursachen. (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, 2018).

Ebenso wird durch Reduzierung der Abflussspitze erreicht, dass der hydraulische Stress in Vorflutern minimiert wird. Hydraulischer Stress in Bezug auf Fließge-

wässer bezieht sich auf die Belastung und Veränderung der Wasserströme aufgrund von Regenwassereinleitungen aus Siedlungsgebieten. Dieser Stress entsteht, wenn das natürliche Fließverhalten des Gewässers durch die zusätzlichen Einleitungen von Regenwasser beeinträchtigt wird. Typischerweise führen stärkere und häufigere Regenwassereinleitungen aus städtischen Gebieten zu einem Anstieg des Wasserspiegels und einer erhöhten Fließgeschwindigkeit in den betroffenen Gewässern (Sieker & Sieker, 2024).

Der hydraulische Stress kann verschiedene negative Auswirkungen auf die Gewässerökologie haben. Zum einen kann er zu einer direkten Schädigung der Lebensgemeinschaft im Gewässer führen, insbesondere wenn die Einleitungen zu häufig oder zu stark sind. Diese unnatürlichen Bedingungen können die natürlichen Lebensräume und Lebensbedingungen der Wasserorganismen beeinträchtigen und langfristig zu Schäden an der aquatischen Umwelt führen. Darüber hinaus kann der hydraulische Stress auch indirekte Auswirkungen auf die Gewässermorphologie haben. Um die erhöhten Abflussspitzen schadlos ableiten zu können, wurden in der Vergangenheit oft Maßnahmen ergriffen, um die Gewässer hydraulisch zu "glätten" oder zu begradigen. Dies kann die natürliche Dynamik des Gewässers beeinträchtigen und zu einer Verschlechterung der Lebensbedingungen für die Wasserorganismen führen. Insgesamt führt der hydraulische Stress dazu, dass das natürliche Gleichgewicht und die Dynamik der Fließgewässer gestört werden, was sich negativ auf die aquatische Umwelt auswirken kann. Es ist daher wichtig, Maßnahmen zu ergreifen, um diesen Stress zu minimieren und die ökologische Integrität der Gewässer zu erhalten (Sieker & Sieker, 2024).

2.2.3 Grundwasserneubildung

Unter Grundwasserneubildung wird das Potenzial für den Anteil des Sickerwassers verstanden, der aus einer Anlage in den Untergrund einsickert und das Grundwasser wieder auffüllen kann. Dabei wird unterschieden, wie viel des Gesamtwasserhaushalts einer Maßnahme tatsächlich infiltriert wird (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, 2018).

2.2.4 Oberflächenabfluss – qualitative Abflussparameter

Feste Stoffe sind ungelöste Bestandteile, die vom Wasser transportiert werden, darunter abfiltrierbare Stoffe (AFS). Diese Stoffe stammen aus Niederschlagsflächen, überspülten Oberflächen und der Luft. Verfahren, die feine Partikel unter 63 µm (AFS63) zurückhalten können, gelten als besonders wirksam, da diese Partikel den Hauptanteil partikulär gebundener Schwermetalle und organischer Schadstoffe transportieren.

Gelöste Stoffe umfassen Pflanzennährstoffe wie Stickstoff und Phosphor, organische Kohlenstoffverbindungen sowie Schwermetalle und Spurenstoffe, die im Wasser gelöst vorliegen und daher leicht verfügbar und reaktionsfreudig sind.

Der Rückhalt bezieht sich auf die Retention der Fracht, wobei bei unzureichenden Daten die Konzentrationsverringerung als Maßstab dient. Verfahren, die biologische oder chemisch/physikalische Prozesse mit den wesentlichen Inhaltsstoffen durchführen, erreichen den höchsten Rückhalt. Bei der Bewertung werden sauerstoffzehrende Parameter wie CSB und Ammonium verwendet, da diese für Sauerstoffmangel nach Regenereignissen in Gewässern und darauffolgendes Fischsterben verantwortlich sind (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, 2018).

Die Abbildung 2-3 zeigt die unterschiedlichen Verschmutzungsquellen, unter anderem Verschmutzungen aus dem öffentlichen Raum, der Industrie bzw. dem Gewerbe, Baustellenschmutz durch beispielsweise Baumaterialien und Sedimente, aber auch Verschmutzungen vom Privatgrundstück wie Waschmittel und Farben.

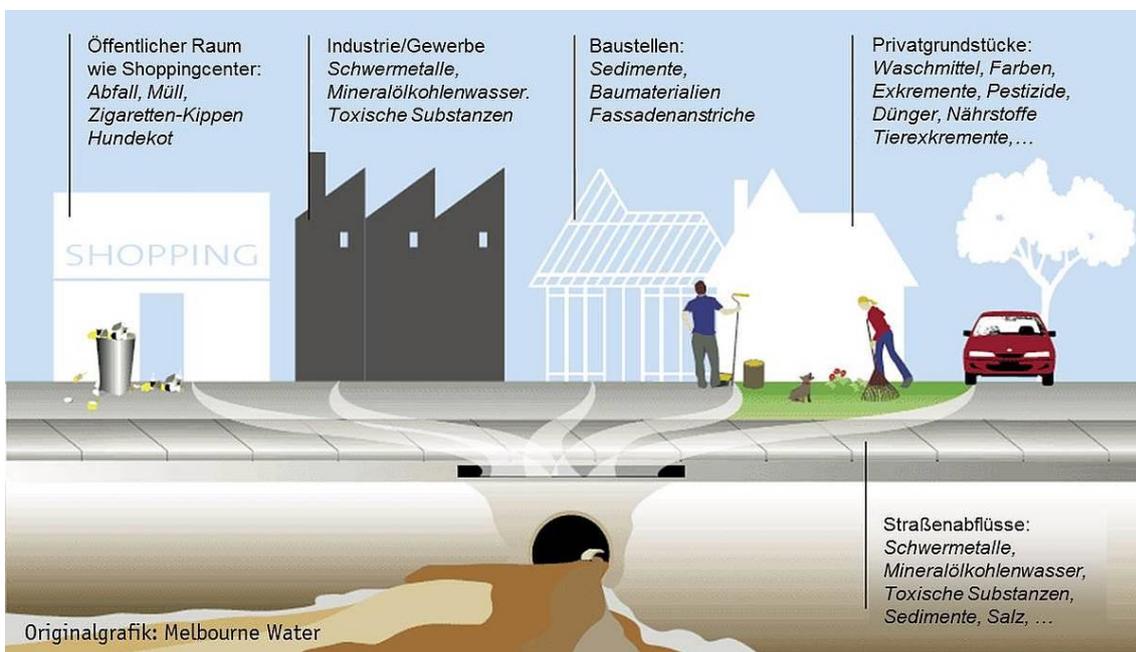


Abbildung 2-3: Verschmutzungsquellen Regenwasserabflüsse (Sieker, 2024b)

Die blau-grüne Infrastruktur bietet eine Vielzahl von Maßnahmen, die zur effektiven Entfernung schädlicher Stoffe aus Regenwasser beitragen. Dazu gehören unter anderem Verfahren wie Sedimentation, Filtration, biologische Behandlung, Sorption und Fällung, die durch die Implementierung entsprechender BGI-Maßnahmen realisiert werden können.

- Filtration, bei der Schwebstoffe basierend auf ihrer Korngröße und Adhäsionskräften am Filtermaterial mechanisch abgetrennt werden. Dies erfolgt typischerweise mit Sieben, Tuchfiltern oder Sand- und Kiesfiltern.
- Sedimentation, welche Schwebstoffe durch Schwerkraft oder Zentrifugalkraft absetzt, abhängig von Partikeldichte und -größe sowie Strömungsverhältnissen im Abscheider.

- Biologische Behandlung, die gelöste Stoffe durch Stoffwechsel oder Biomasseaufbau umsetzt. Hierbei spielen Verfahren mit Biofilm- oder Pflanzenwachstum eine wichtige Rolle.
- Sorption, wo ein Filtermedium gelöste Stoffe aufnimmt und wieder abgibt, abhängig von Konzentrationsgefällen.
- Fällung, welche gelöste Stoffe durch chemische Bindung bei Überschreitung des Löslichkeitsprodukts ausscheidet, oft in Kombination mit Adsorption in reaktiven Filtern.

(Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, 2018)

Wie bereits in der Zielsetzung (vgl. 1.1) erwähnt, werden qualitative Abflussparameter, wie die Reduktion von gelösten und ungelösten Stoffen, in dieser Masterarbeit nicht im Detail betrachtet.

2.3 Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur

In diesem Kapitel wird auf die Regenwasserbewirtschaftung und die Implementierung der daraus resultierenden Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur eingegangen.

Ein neuer konsequenter Umgang mit Niederschlagswasser ist entscheidend, um die Folgen der städtischen Verdichtung und des Klimawandels zu bewältigen (vgl. 2.1). Dies beinhaltet, wie im vorherigen Unterkapitel 2.2 bereits beschrieben, die Regenwasserbewirtschaftung vor Ort mit Maßnahmen der BGI und die Begrenzung der Ableitung auf ein „*natürliches*“ Maß. Es gibt eine Vielzahl von naturnahen und technischen Verfahren zur Verdunstung, Versickerung und Speicherung von Regenwasser (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, 2018). In den folgenden Unterkapiteln werden jedoch die für das Projekt „PeriSponge“ relevanten BGI-Maßnahmen beschrieben.

2.3.1 Allgemeine Beschreibung

Urbane blau-grüne Infrastruktur ist ein Netzwerk aus naturnahen und gestalteten Flächen und Elementen in Städten, die gemeinsam eine hohe Qualität in Bezug auf Nutzbarkeit, biologische Vielfalt und Ästhetik aufweisen und ein breites Spektrum an Ökosystemleistungen erbringen. Dabei können alle Arten von vegetations- und wassergeprägten Flächen und Einzelelementen Teil der blau-grünen Infrastruktur sein, unabhängig von Besitzverhältnissen und Entstehung. Urbane blau-grüne Infrastruktur ergänzt und ersetzt teilweise die graue Infrastruktur, wodurch sie insgesamt die Lebensqualität und Attraktivität von Städten verbessert und zur Daseinsvorsorge beiträgt (Rieke et al., 2017).

Als graue Infrastruktur werden technische, gebaute Elemente in städtischen und Siedlungsgebieten bezeichnet. Darunter fallen Straßen, Schienen, Wasserver-

sorgungs- und -entsorgungssysteme, Energieversorgungseinrichtungen und Abfallentsorgungssysteme (Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), 2021).

Herkömmliche Formen der grauen Infrastruktur bzw. der Regenwasserbewirtschaftung haben einige Nachteile, die durch angepasste Planung überwunden werden können (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, 2018).



Abbildung 2-4: Darstellung lebenshemmender Faktoren für Pflanzen in Städten (Climateways, 2023).

In der nachfolgenden Abbildung 2-5 sieht man die Idee und das Konzept einer blau-grünen Infrastruktur. Die einzelnen Elemente der urbanen blau-grünen Infrastruktur bilden ein räumlich und funktional zusammenhängendes Netz, das die biologische Vielfalt und durch Ökosystemleistungen die Lebensqualität fördert.

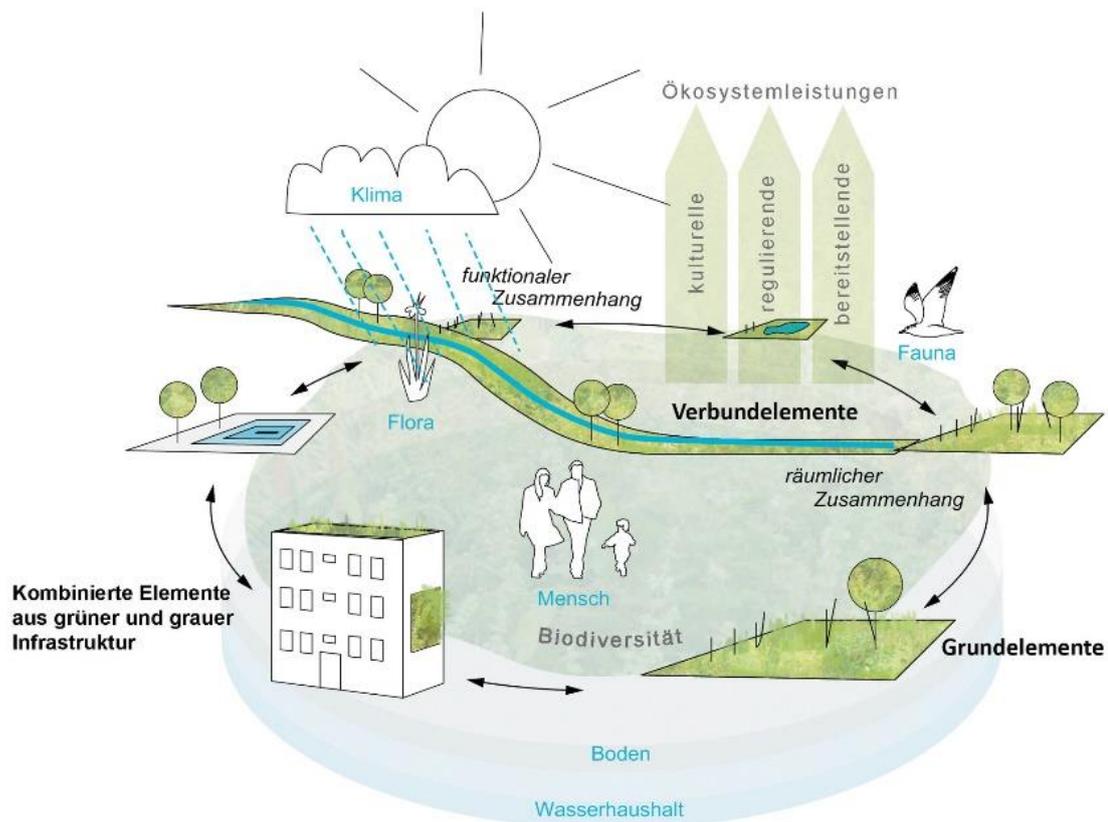


Abbildung 2-5: Schematisches Konzept einer blau-grünen Infrastruktur in städtischen Gebieten (bgmr Landschaftsarchitekten, 2023)

Laut dem Bericht des deutschen Bundesministeriums für Naturschutz, das 2017 veröffentlicht wurde, betrachtet die blau-grüne Infrastruktur grüne Flächen als unverzichtbare Basis, gleichwertig zur technischen und sozialen Infrastruktur. Grüne Flächen in urbanen Räumen sind Elemente wie Parks, Wälder und Bäume, die zum Wohlbefinden von Bewohner*Innen beitragen. Ebenso trägt die blau-grüne Infrastruktur, bestehend aus natürlichen, naturnahen und gestalteten Grünräumen, zur Sicherung von Ökosystemleistungen und zur Förderung der biologischen Vielfalt bei. Die blau-grüne Infrastruktur verfolgt einen integrativen Ansatz, um kommunale Akteur*Innen zu vereinen. Dabei werden gemeinsame Ziele mit Disziplinen wie Wohnen, Mobilität, Ver- und Entsorgung, Soziales oder Gesundheit gestärkt (Rieke et al., 2017)

2.3.2 Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur im EZG Feldbach

Das gesamte Projektkonsortium „PeriSponge“ entwickelte speziell für das EZG Feldbach einen Maßnahmenplan für den wassersensiblen Umbau des Straßenzugs Oedter Straße.

Grundsätzlich werden für diese Masterarbeit BGI-Maßnahmen der Versickerung und der Verdunstung (BlueGreenStreets, 2022).

Zu den Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur zur Förderung der Verdunstung gehört das Verdunstungsbecken. Zu den Maßnahmen der BGI zur Förderung der Versickerung gehören hingegen wasserdurchlässige Bodenbeläge, Versickerungsmulden und Tiefbeete (BlueGreenStreets, 2022).

Im Folgenden werden die geplanten BGI-Maßnahmen für das Projekt "PeriSponge" allgemein beschrieben. Weiters werden die Parameter im Unterkapitel 3.8 erläutert, die für die Modellierung des hydrologischen Modells der BGI-Maßnahmen verwendet werden.

2.3.2.1 Verdunstungsbecken

Zu den BGI-Maßnahmen der Verdunstung zählt das Verdunstungsbecken, das im SWMM-Programm unter „Vegetative Swale“ modelliert (vgl. 3.3.1) wird und im Verlauf der Masterarbeit als „Vegetative Mulde“ übersetzt wird.

Vegetative Mulden sind Kanäle oder Vertiefungen mit abfallenden Seiten, die mit Gras und anderen Pflanzen bedeckt sind. Sie verlangsamen den Abfluss gesammelten Niederschlags und ermöglichen ihm mehr Zeit, in den darunter liegenden natürlichen Boden zu versickern (Rossmann, 2015).

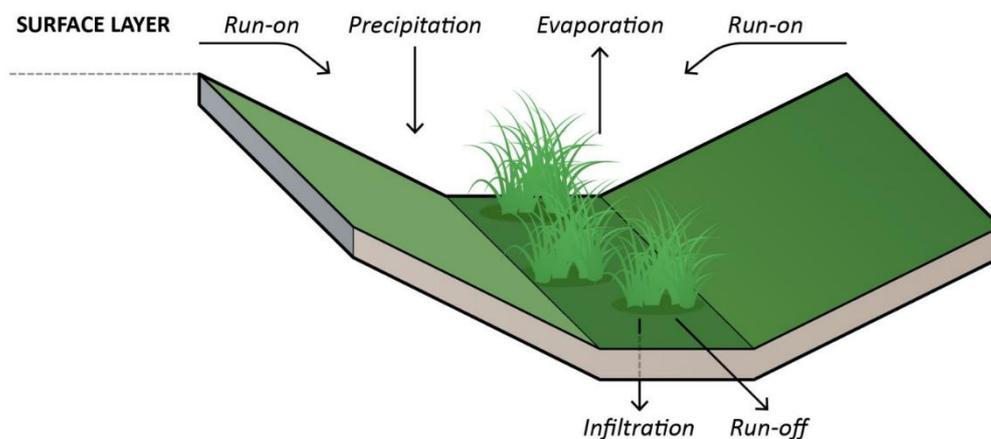


Abbildung 2-6: Darstellung des Aufbaus für vegetative Mulden (PCSWMM Support, 2024c)

Außerdem ist die vegetative Mulde naturnah gestaltet und nach unten hin abgedichtet. Dadurch wird verhindert, dass das Wasser, das in die Mulde gelangt, in den Boden versickert. Stattdessen kann das Wasser über die Pflanzen in der vegetativen Mulde verdunsten. Das Becken ist leicht geneigt, mit einem Gefälle von etwa 1%, in Richtung der Regenmulde ausgeführt, so dass überschüssiges Wasser bei ausreichender Zufuhr abfließen kann. Die Abbildung 2-6 zeigt das Verdunstungsbecken, das in unserem Modell lediglich aus einer Oberfläche und keinem Speicherraum besteht (BlueGreenStreets, 2022).

2.3.2.2 Wasserdurchlässige Bodenbeläge

Wasserdurchlässige Bodenbeläge werden im SWMM-Programm unter „Permeable Pavement“ modelliert, das übersetzt „Sickerfähiger Parkplatz“ bedeutet und im weiteren Verlauf der MA auch so identifiziert wird.

Sickerfähige Parkflächen, etwa Blockpflaster-Systeme, bestehen je nach Aufbau aus undurchlässigen Pflastersteinen, die auf einem Sand- oder Kiesbett liegen, wobei sich darunter eine Kieslagenschicht befindet. Niederschlag wird in den offenen Zwischenräumen zwischen den Steinen aufgefangen und zur Speicherzone und dem natürlichen Boden darunter geleitet (Rossmann, 2015).

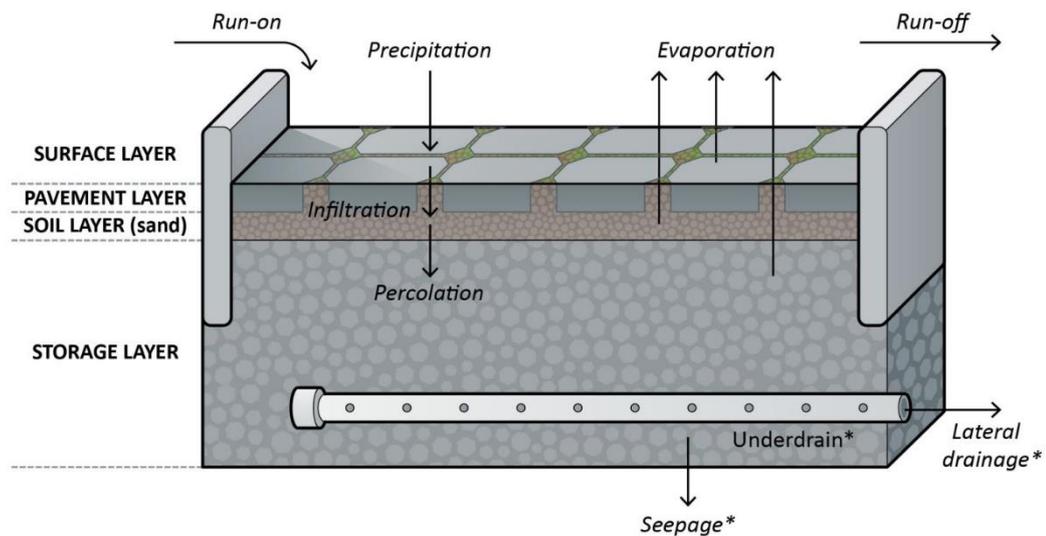


Abbildung 2-7: Darstellung des Aufbaus für versickerungsfähige Parkplätze (PCSWMM Support, 2024c)

Sie nehmen das Regenwasser von angrenzenden oder sogar von der befestigten Fläche selbst auf und lassen es großflächig versickern, ohne dabei eine Ansammlung von Wasser auf der Oberfläche zu verursachen. Die Zufuhr des Wassers kann entweder linear über die Straßenböschung oder punktuell über offene Rinnen erfolgen. Dabei ist es wichtig sicherzustellen, dass das Wasser gleichmäßig über die gesamte Versickerungsfläche verteilt wird (BlueGreenStreets, 2022).



Abbildung 2-8: Ausführung eines sickerfähigen Parkplatzes

2.3.2.3 Versickerungsmulden

Versickerungsmulden werden im SWMM-Programm unter „Bio-Retention Cell“ modelliert, das übersetzt „Bioretentionszelle“ bedeutet, für die Masterarbeit als Sickermulde identifiziert wird.

Sickermulden sind Vertiefungen, die Vegetation in einem speziell gewählten Aufbau enthalten, die über einem Kiesdrainagebett platziert wird. Sie bieten Speicherung, Infiltration und Verdunstung sowohl von direktem Niederschlag als auch von Oberflächenabflüssen, die aus den umliegenden Gebieten aufgefangen werden (Rossmann, 2015).

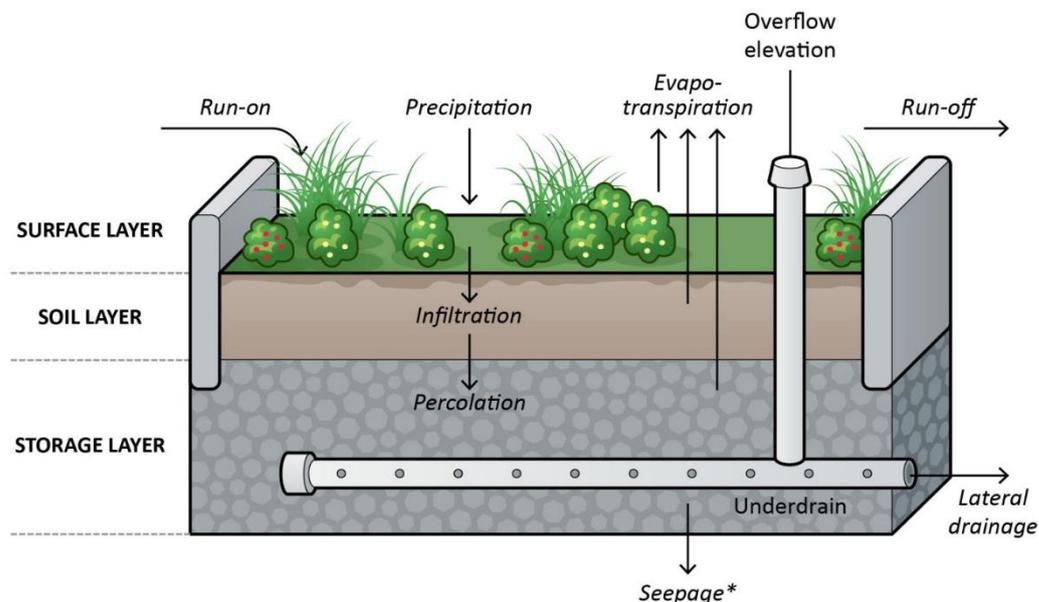


Abbildung 2-9: Darstellung des Sickermuldenaufbaus (PCSWMM Support, 2024c).

2.3.2.4 Tiefbeet

Tiefbeete werden im SWMM-Programm unter „Raingarden“ modelliert, das übersetzt „Regengarten“ bedeutet und für die Masterarbeit auch als „Regengarten“ identifiziert wird.

Regengärten sind eine Art von Sickermulden, die nur aus der Bodenschicht besteht, ohne dass sich darunter ein Kiesbett befindet (Rossmann, 2015).

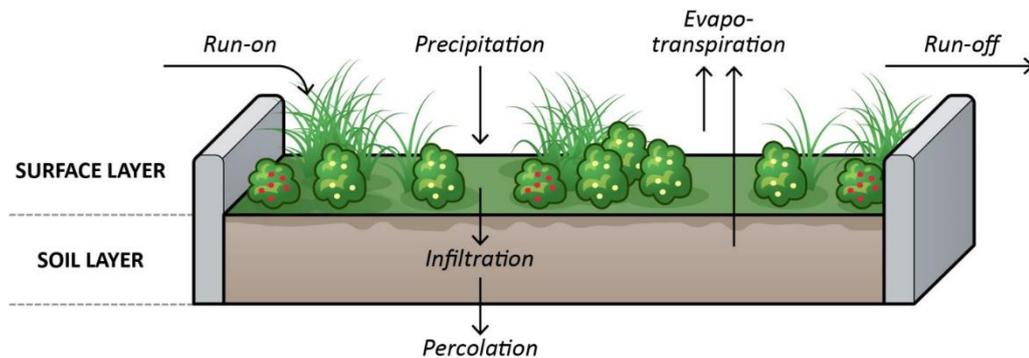


Abbildung 2-10: Darstellung des Regengartenaufbaus (PCSWMM Support, 2024c)

Tiefbeete bzw. Regengärten dienen als Versickerungselemente und ermöglichen in städtischen Gebieten mit begrenztem Platzangebot die vorübergehende Speicherung und Versickerung von Regenwasser. Diese begrünten und tiefergelegten Versickerungsanlagen werden von einem Rahmen aus Beton oder Naturstein umgeben, um auf kleinem Raum eine größere Menge Regenwasser aufnehmen zu können. Wie bei herkömmlichen Mulden sollten die Bermenhöhen in der Regel 30 cm nicht überschreiten.

Die Übersicht der Bodenschichten der gewählten BGI-Maßnahmen können der Tabelle 3-10 entnommen werden. Die gewählten Parameter der jeweiligen relevanten BGI-Maßnahmen können der Tabelle 3-11 entnommen werden.

2.3.3 Übersicht der BGI-Maßnahmen im EZG Feldbach

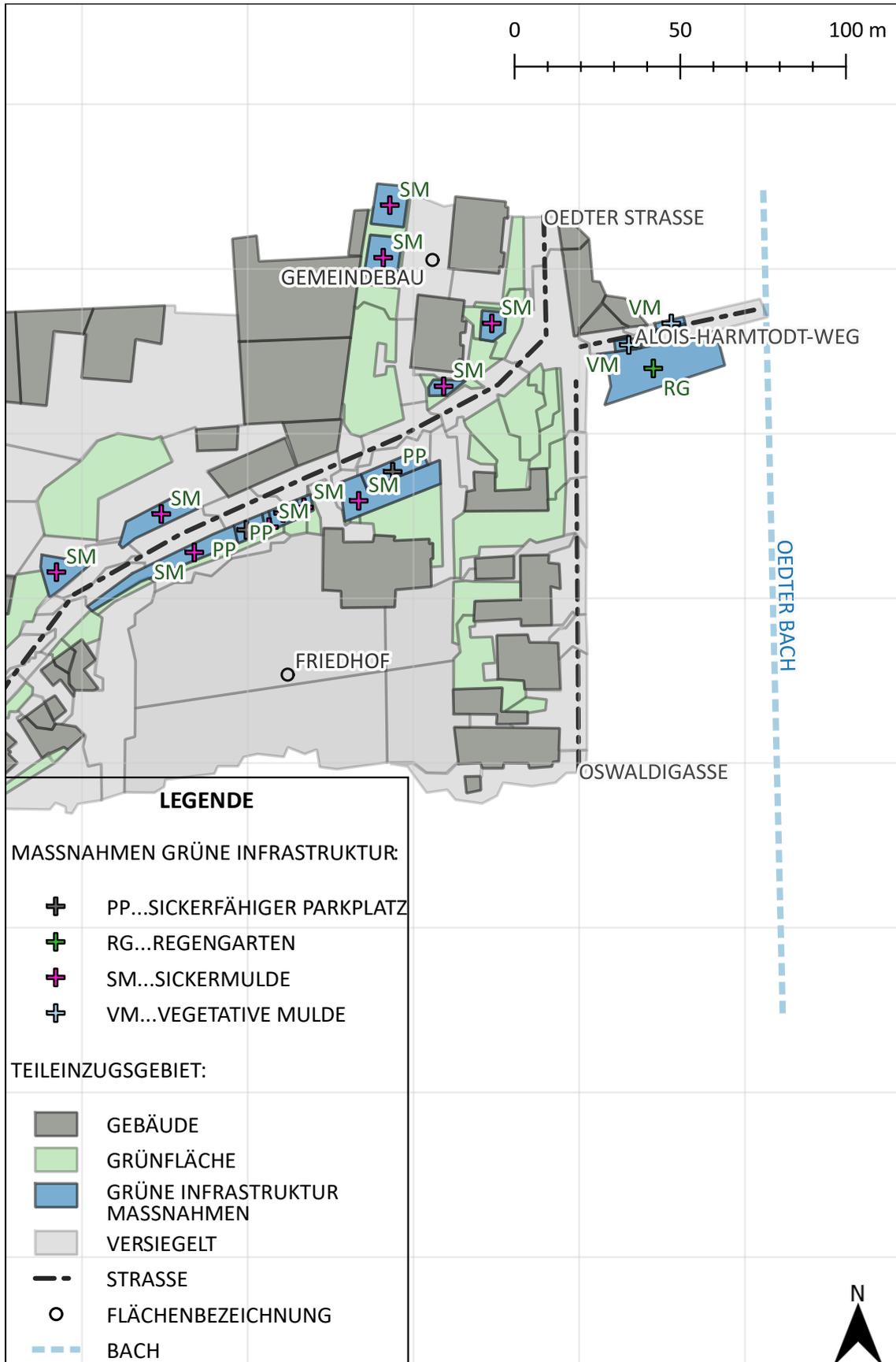


Abbildung 2-11: Ausschnitt des Einzugsgebietes Feldbach mit Übersicht aller blau-grünen Infrastrukturmaßnahmen sowie deren Unterscheidung.

Die 16 BGI-Maßnahmen, die in der Abbildung 2-11 in Blau dargestellt sind, sind entsprechend mit den angrenzenden Teileinzugsgebieten verbunden, um den Zu- und Abfluss darzustellen. Die Flächen sind unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten und durch Vorgaben der Planung so realistisch wie möglich miteinander erschlossen. In der Methodik (vgl.3.8) wird genauer auf die einzelnen BGI-Maßnahmen, die Parameter der Bodenschichten, die Unterscheidung, etc. eingegangen.

3 Methodik

In diesem Kapitel werden die Methodik, Hintergrundinformationen sowie benötigten Modelldaten erläutert, mit denen das Modell des IST-Zustandes und das Modell mit Maßnahmen der BGI erstellt werden.

Die Parameter, Standorte und Verbindungen der Maßnahmen sowie die Größe der betroffenen Flächen wurden zum Zeitpunkt der Erstellung der Masterarbeit festgelegt und zum Teil durch Literaturrecherche angenommen (vgl. Tabelle 3-11). Allerdings gab es während des Verlaufs der Masterarbeit Änderungen in den Vorgaben, Plänen und der Erschließung von Flächen, die nicht mehr in die Masterarbeit integriert und geändert werden konnten, da dies ständige Änderungen in der Modellierung herbeiführen würde und zeitlich nicht möglich wäre. Daher basieren die folgenden Daten, die für die Erstellung der Masterarbeit verwendet wurden, auf dem Stand zum Zeitpunkt der Modellerstellung.

3.1 Herangehensweise und Modellaufbau

Zur Simulation des Abflusses von Regenwasser sind grundlegende Daten erforderlich, einschließlich Informationen über das Einzugsgebiet (vgl. 3.2), die Lage und das Gelände des Gebietes (vgl. 3.2.1) und den Niederschlag im betrachteten Einzugsgebiet (vgl. 3.4.3), der im Modell als Belastung berücksichtigt wird. Darüber hinaus werden weitere Parameter benötigt, die den Abfluss beeinflussen, wie die Oberflächenbeschaffenheit, die Durchflussmessdaten, Bodenparameter, Verdunstung und die Merkmale der Entwässerungssysteme, um den Abfluss möglichst realitätsnah zu simulieren. Im Folgenden werden alle Eingangsdaten beschrieben, die zur Erstellung des Modells verwendet werden (vgl. 3.4).

Wie in 1.1 erwähnt, folgt nach der Erstellung des IST-Modells die Kalibrierung, Validierung und die Implementierung der BGI-Maßnahmen in einem zweiten Modell. Für beide Modelle erfolgt eine zehnjährige Langzeitsimulation, um Daten für einen Vergleich der Wirksamkeit der BGI-Maßnahmen geben zu können.

3.2 Eingrenzung des Einzugsgebietes Feldbach

In diesem Unterkapitel wird auf das Einzugsgebiet Feldbach und dessen Hintergrundinformationen eingegangen.

Für das Projekt „PeriSponge“ Feldbach wurde eine Eingrenzung des Einzugsgebietes mit Hilfe eines digitalen Geländemodells erstellt. Dies wurde vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau zur Verfügung gestellt.

Das Einzugsgebiet besteht aus einzelnen Teileinzugsgebieten (TEZG). In der Abbildung 3-1 werden die Teileinzugsgebiete in einem hellen orange angedeutet. Man erkennt anhand der schwarzen gestrichelten Linien, wohin das Oberflächenwasser der jeweiligen Teileinzugsgebiete mündet. Die orangenen Punkte deuten

auf die Schächte im EZG hin, während die gelben Linien die Verläufe der Kanäle zeigen, die die entsprechenden Schächte verbinden.

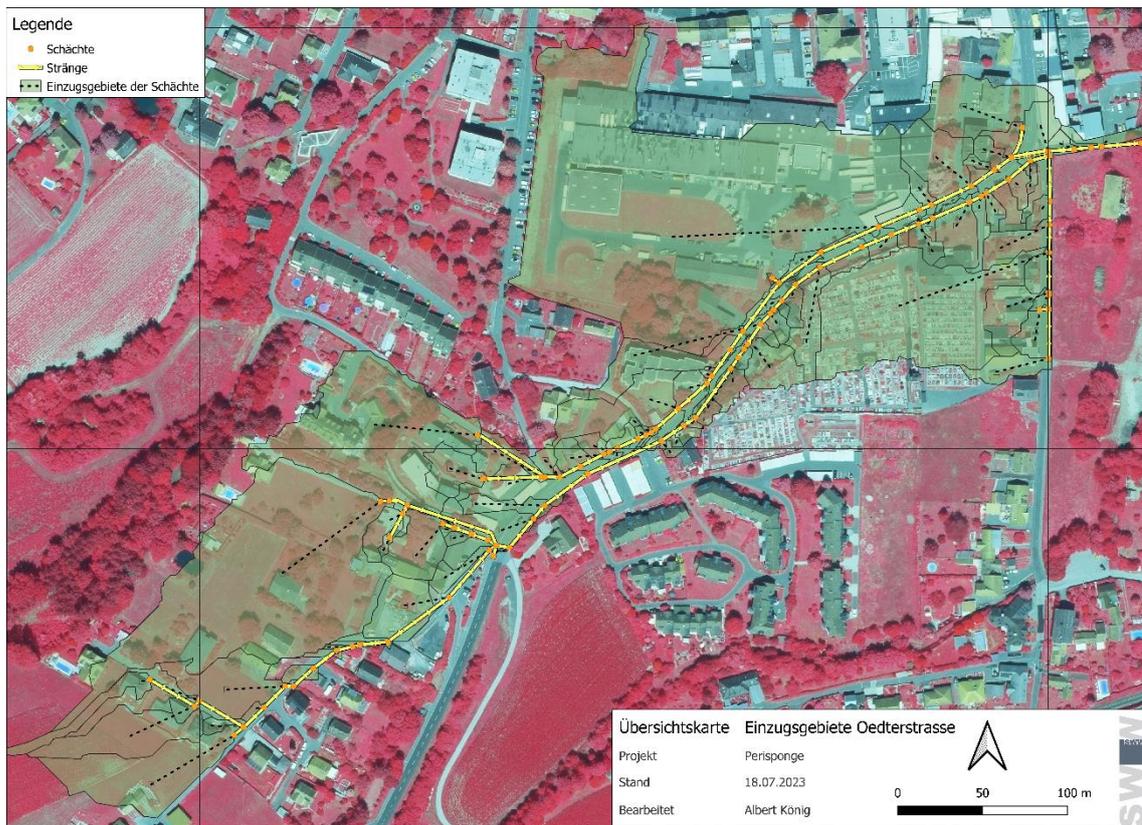


Abbildung 3-1: Eingrenzung des Einzugsgebietes Feldbach basierend auf einem Digitalen Geländemodell. (Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, 2024)

Das Einzugsgebiet ist mit samt den Schächten und Kanälen in das Programm SWMM implementiert und anschließend in das Programm PCSWMM übertragen worden. Die Abbildung 3-2 zeigt das EZG Feldbach und dessen Teileinzugsgebiete.



Abbildung 3-2: Darstellung der einzelnen Teileinzugsflächen, die das gesamte Einzugsgebiet zusammenfassen

3.2.1 Lage und Gelände

Diese Masterarbeit behandelt ein Einzugsgebiet in Feldbach, das sich entlang der Oedter Straße bis zum Oedterbach erstreckt. Feldbach ist eine kleine Stadt, die sich im Norden des Bezirkes der Südoststeiermark befindet.

Die Oedter Straße verläuft in einem abfallenden Gelände in Richtung des Oedterbachs. Die Seitenstraßen, Quergassen und Seitenflächen führen mit einer Neigung zur Oedter Straße hin. Das Gebiet auf einer Höhe von etwa 285 Metern über dem Meeresspiegel ist grün dargestellt, während das Einzugsgebiet (EZG) in den höheren Lagen, etwa auf 320 Metern über dem Meeresspiegel, in Rot gekennzeichnet ist. Das Gefälle, wie beschrieben, ist deutlich in der Abbildung 3-3 erkennbar.

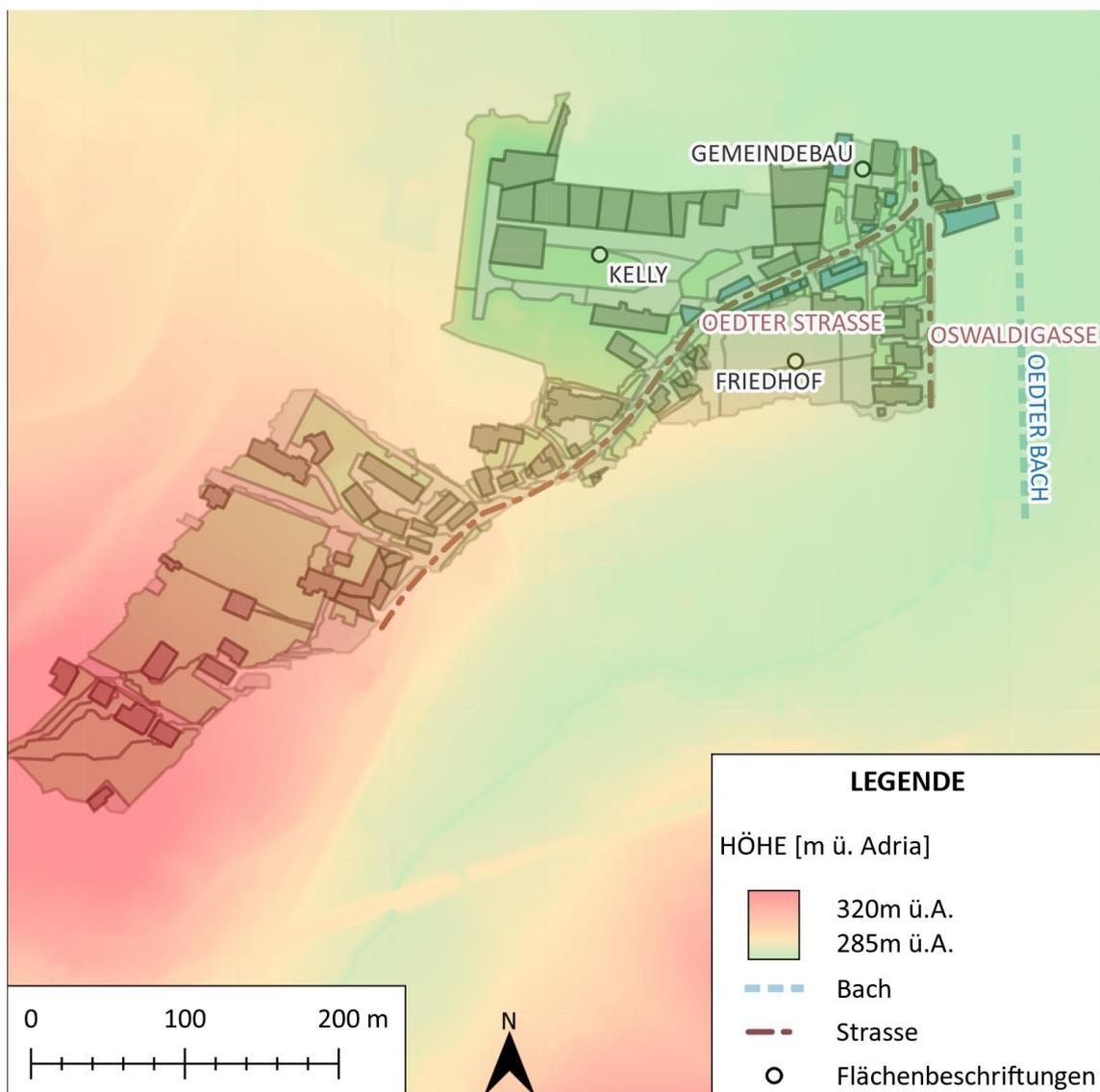


Abbildung 3-3: Darstellung des EZG Feldbach und Höhe des EZG in Meter ü. Adria

3.2.2 Problematik im Einzugsgebiet Feldbach

Die Problematiken im EZG Feldbach liegen sowohl in der Topografie als auch in der Versiegelung der Straßenflächen und führen zu wasserwirtschaftlichen Herausforderungen (vgl. 2.2). Die angrenzenden Flächen liegen zumeist auf einer höheren Ebene im Vergleich zur Straße. Sie weisen daher ein kontinuierliches Gefälle zur Straße hin auf (vgl. 3.2.1). Somit führt das topografische Gefälle dazu, dass das Niederschlagswasser von den höher gelegenen Flächen natürlicherweise zur Straße hin abfließt. Die Oedter Straße bildet dabei eine natürliche Sammelstelle für das Niederschlagswasser, das punktuell im Anschluss in die Kanalschächte und weiter in die Kanalstränge geleitet wird. Da die Oedter Straße ebenso in einem Gefälle in Richtung Oedterbach verläuft, fließt das Oberflächenwasser, das teilweise nicht in den Schacht gelangt, entlang der Straße hinunter und mündet schließlich in den Bach bzw. sammelt sich im Bereich des Alois-Harmtodt-Weges. Dieser Weg befindet sich vor dem Oedterbach und bildet dabei

die tiefste Fläche, bei dem sich das Niederschlagswasser an der Oberfläche ansammelt, wenn die Schächte und Regenkanäle überfüllt sind (vgl. Abbildung 3-3). Dies passiert vor allem, wenn bei starken Regenereignissen die Kanalstränge überlastet sind und das Oberflächenwasser nicht in die Kanalschächte abfließen kann. Dabei entstehen Überschwemmungen und das Wasser flutet den Bereich um den Alois-Harmtodt-Weges, bis die Regenkanäle sich wieder leeren und das Oberflächenwasser in die Schächte abfließen kann.

3.3 Software

Für das hydrologische Modell und den Modellaufbau wurde die Software EPA SWMM verwendet. Für die Kalibrierung, Validierung und Implementierung von Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur wurde im Anschluss die Software PC-SWMM verwendet. Für die Darstellung des EZG Feldbach in dieser Masterarbeit wurde das Programm QGIS herangezogen.

3.3.1 EPA SWMM und PC-SWMM

EPA SWMM ist ein hydrodynamisches Modellierungsprogramm und steht für „Storm Water Management Model“. Dieses Programm wurde von der United States Environmental Protection Agency (EPA) entwickelt und ist weltweit verbreitet, welches für die Modellierung von städtischen Abwasser- und Niederschlagsabflusssystemen verwendet wird (US EPA, 2023). Das hydrologische Modell wurde mithilfe von SWMM erstmalig aufgebaut und die ersten Simulationsläufe auf ihre Richtigkeit getestet.

PCSWMM (PCSWMM, 2023) ist eine eigenständige Software, die auf dem SWMM-Modell basiert und erweiterte Funktionen für die Modellierung und Analyse von Entwässerungssystemen bietet. Es ist eine Anwendung mit einer benutzerfreundlichen Oberfläche und verbesserten Analysetools im Vergleich zur reinen SWMM-Software. PCSWMM wird häufig dazu verwendet, um detaillierte Simulationen von Regenwasserabfluss und Überflutung in städtischen Gebieten durchzuführen.

3.3.2 QGIS

Für die Erstellung von Darstellungen des EZG und der BGI-Maßnahmen wird in dieser Masterarbeit das Programm QGIS (Quantum GIS) verwendet, ein Open-Source-Geoinformationssystem, das für die Erstellung, Bearbeitung, Analyse und Visualisierung von Geodaten verwendet wird (QGIS, 2024).

3.4 Datengrundlage

Wie in 3.1 erwähnt, sind für die Modellierung des hydrologischen Modells einige Daten und Informationen notwendig.

3.4.1 Kanaldaten

Die Kanaldaten wurden vom Unternehmen Lugitsch & Partner Ziviltechniker GmbH erhoben und von der Stadtgemeinde Feldbach als CAD-Datei zur Verfügung gestellt. Anschließend wurde diese Datei vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft in ein SWMM-Modell integriert und für die weitere Verwendung in der Masterarbeit verwendet. Das Entwässerungssystem im Einzugsgebiet ist als Trennsystem ausgelegt, das Regen- und Schmutzwasser separat ableitet.

Die Kanaldaten bestehen aus einem Netzwerk von Regenkanälen und Kanalschächten, die das Wasser punktuell aufnehmen und über die Kanalstränge ableiten.

3.4.2 Durchflussdaten

Um ein Modell möglichst präzise abzubilden, sind Durchflussdaten erforderlich, um die simulierten Modelle kalibrieren und validieren zu können. In diesem Zusammenhang wurde von Mitarbeitern des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der TU-Graz vom 31.05.2023 bis 31.07.2023 Durchflussmessgeräte im letzten Schacht vor dem Oedterbach installiert. Damit wurden Wasserstand und Fließgeschwindigkeit gemessen, ehe in weiterer Folge der Durchfluss berechnet wurde. Schlussendlich standen Durchflussmessungen in einem Intervall von 2 Minuten bereit.

Die Abbildung 3-4 stellt die Position der Messstation der Durchflussdaten als rotes Kreuz oben rechts im Bild dar.

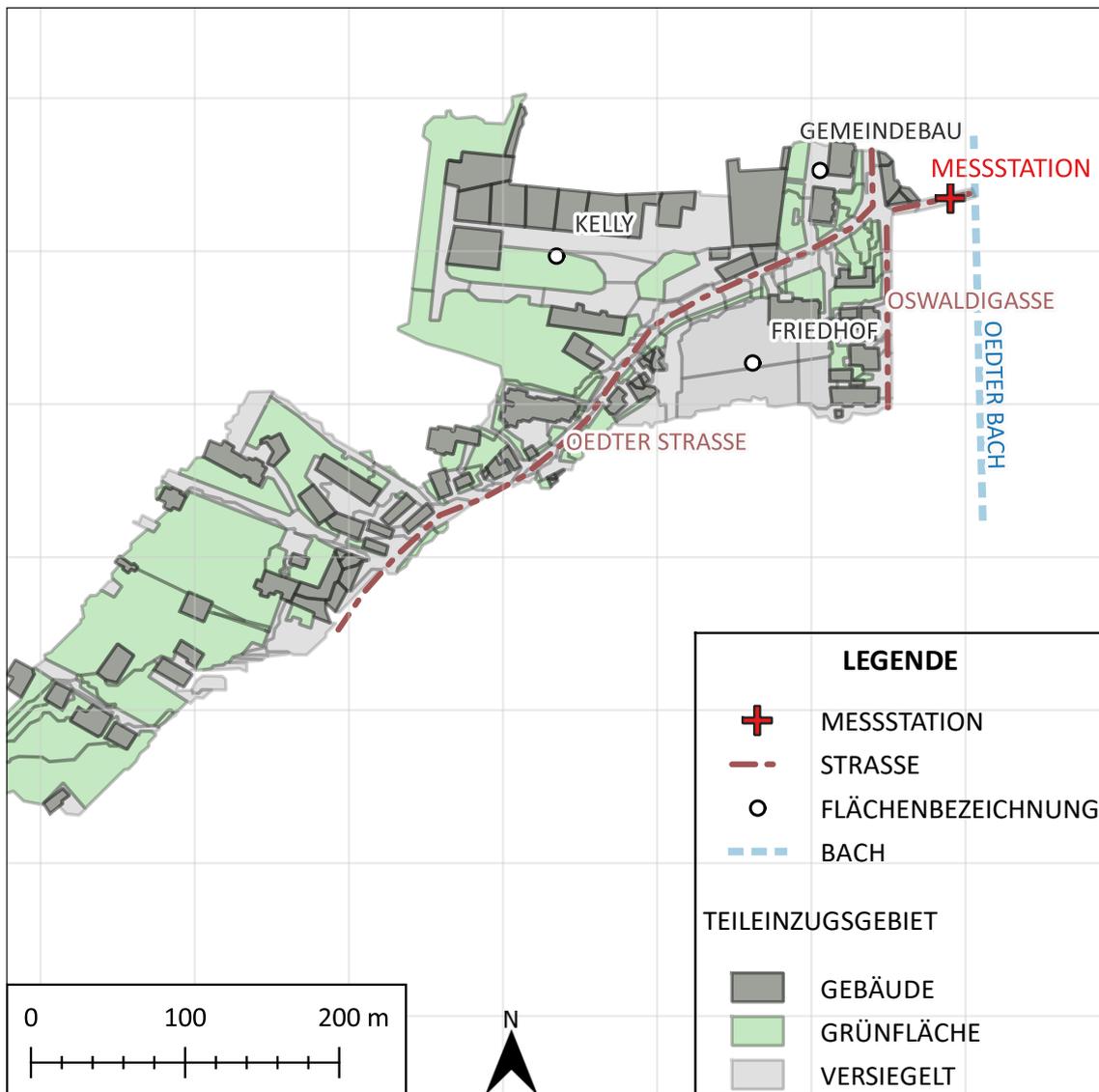


Abbildung 3-4: Darstellung des Standorts der Messstation im Einzugsgebiet Feldbach

3.4.3 Niederschlagsdaten

Wie im vorherigen Unterkapitel 3.4.2 bereits erwähnt, wurden Durchflussdaten für den Zeitraum vom 31.05.2023 bis 31.07.2023 gesammelt und ausgewertet. Aus diesem Grund sind ebenso Niederschlagsdaten und Temperaturdaten, die für die Verdunstung notwendig sind, für diesen Zeitraum erforderlich, um anschließend das Modell kalibrieren und validieren zu können.

Die Durchflussdaten sind in einem Intervall von zwei Minuten gemessen worden. Daher werden auch Niederschlagsdaten für die Simulation mit einem möglichst niedrigen Intervall verwendet, um das Modell realitätsgetreu abbilden zu können.

Um Niederschlagsdaten zu erhalten, werden Daten von folgenden zwei Betreibern herangezogen:

- Der Hydrografische Datenverbund (betreibt ein Basismessnetz zur Erfassung des Niederschlags, zur Bestimmung von Durchfluss und Wasserstand an Fließgewässern und Seen und zur Beobachtung der Grundwasserstände in Österreich) (Bundesministerium, 2023)
- WegenerNet (stellt eine neue Langzeit-Datenressource in der österreichischen und internationalen Wetter-, Klima- und Ökosystemforschung dar, für die Feldbachregion wird die kleinregionale Wetter- und Klimaentwicklung an über 150 Klimastationen untersucht) (Fuchsberger et al., 2023)

In der nachfolgenden Abbildung 3-5 sieht man eine Karte des EZG Feldbachs mit den Standorten der Niederschlagsmessstationen. Das EZG Feldbach wird als dunkelgraues Polygon abgebildet und die beiden Niederschlagsmessstellen werden mit den blauen Sechsecken angedeutet. Im Norden des EZG befindet sich die Messstation des Betreibers vom hydrografischen Datenverbund. Im Süden befindet sich die Messstelle vom WegenerNet. Die Daten von WegenerNet werden in Intervallen von fünf Minuten bereitgestellt, während die Daten des hydrografischen Dienstes normalerweise in Intervallen von zehn Minuten vorliegen. Aufgrund einer Anfrage wurden jedoch auch Daten in Fünf-Minuten-Intervallen bereitgestellt.

Man erkennt, dass sich die Messstation vom WegenerNet südlich vom EZG und unmittelbar beim EZG befindet.

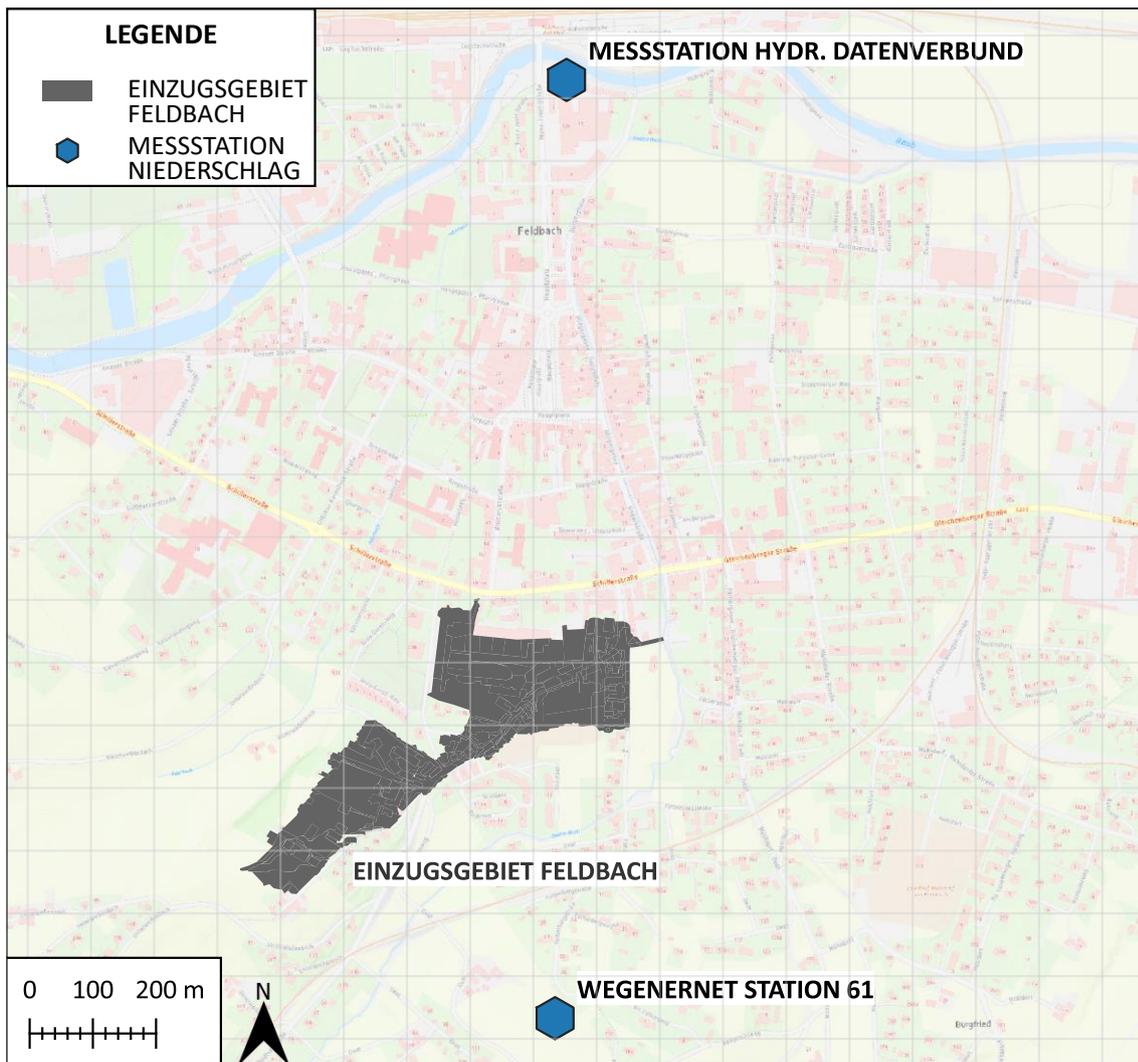


Abbildung 3-5: Darstellung der Standorte der Messstationen für Niederschlagsdaten im Einzugsgebiet von Feldbach.

Bei der Datenaufbereitung wurden zunächst alle Regenereignisse aus den zur Verfügung gestellten Aufzeichnungen betrachtet. Es wurden alle Regenereignisse in einer Tabelle festgehalten. Im Anschluss sind die Regenmenge und die Regendauer der jeweiligen Ereignisse in der Tabelle 3-1 aufgenommen worden.

Tabelle 3-1: Auflistung aller Niederschlagsereignisse, die im relevanten Zeitraum vom 31. Mai 2023 bis zum 31. Juli 2023 aufgetreten sind. Zudem Darstellung der Kategorienzuweisungen für jedes einzelne Ereignis (Spalte 4).

Regenereignisse	Wegenernet						EHYD 5min					
	Gesamtniederschlag pro Event [mm/Event]	Ausschluss	Verwendung K...Kalibrierung V...Validierung	Gesamtniederschlag pro Event [mm/Event]	Zeitraum [hh:mm]	Regenereignisdauer [hh:mm]	max. Niederschlagsmenge [mm/5min]	Windrichtung	Gesamtniederschlag pro Event [mm/Event]	Zeitraum [hh:mm]	Regenereignisdauer [hh:mm]	max. Niederschlagsmenge [mm/5min]
02.06.2023	1,10	x			12:40 13:30	00:50	0,20	N	4,54	12:40 13:05	00:25	1,52
	0,50	x			23:05 23:35	00:30	0,10	NO	0,32	22:50 23:05	00:15	0,16
04.06.2023	10,60		K	<16mm	15:25 17:35	02:10	2,00	N	8,13	15:35 17:30	01:55	1,04
	11,90	x			19:55 22:00	02:05	1,80	N	6,52	20:05 21:45	01:40	1,86
05.06.2023	15,70		V	<16mm	08:10 17:55	09:45	1,50	N	15,56	08:15 17:45	09:30	1,60
06.06.2023	0,80	x			16:45 17:20	00:35	0,30	N/ONO	11,24	16:25 21:30	05:05	1,36
	6,30	x	V	<7mm	17:45 21:10	03:25	0,50	N/ONO	-	-	-	-
07.06.2023	10,90	x			13:20 13:55	00:35	4,80	N	0,72	13:20 13:40	00:20	0,16
07.06.2023	7,70	x			16:00 16:10	00:10	6,00	N	0,00	-	-	0,00
08.06.2023	5,00		K	<7mm	15:10 15:45	00:35	1,50	N	6,25	15:10 15:45	00:35	1,76
09.06.2023	1,30	x			15:05 16:25	01:20	0,40	N	1,20	14:55 15:15	00:20	0,49
10.06.2023	0,10	x			03:15 03:20	00:05	0,10	N	-	-	-	-
	0,80	x			11:50 12:00	00:10	0,70	N	-	-	-	-
11.06.2023	2,70		K	<3mm	08:10 09:15	01:05	0,20	N	0,94	08:05 08:45	00:40	0,16
	1,50				10:10 11:50	01:40	0,30	N	1,26	10:10 10:40	00:30	0,32
14.06.2023	0,30	x			20:25 20:35	00:10	0,10	N	0,16	20:30 20:35	00:05	0,16
	0,10	x			04:00 04:05	00:05	0,10	N	0,08	04:00 04:05	00:05	0,08
14.06.2023	0,80		V	<3mm	07:40 08:00	00:20	0,30	N	0,56	07:40 07:55	00:15	0,32
	0,10				08:45 08:50	00:05	0,10	N	0,48	08:40 08:50	00:10	0,24
	0,20				09:35 09:40	00:05	0,20	N	0,30	09:35 09:40	00:05	0,00
	0,40				10:25 10:35	00:10	0,20	N	-	-	-	-
	0,20				12:00 12:10	00:10	0,10	NO	-	-	-	-
17.06.2023	0,30	x			14:30 14:35	00:05	0,30	-	0,08	14:30 14:35	00:05	0,08
21.06.2023	0,60	x			20:05 21:45	01:40	0,10	NOW/N	0,32	20:20 21:05	00:45	0,16
23.06.2023	19,50		K	>16mm	15:00 19:45	04:45	2,60	NNW/N	19,24	15:00 19:30	04:30	3,44
27.06.2023	0,80		K	<3mm	11:25 11:55	00:30	0,20	N	0,64	11:20 11:55	00:35	0,24
	1,70				12:45 13:45	01:00	0,60	N	1,28	13:05 13:45	00:40	0,48
	0,40				16:35 17:40	01:05	0,10	-	0,40	16:35 16:45	00:10	0,16
28.06.2023	5,10		V	<7mm	03:50 08:05	04:15	0,80	N/WNW	4,90	04:00 07:10	03:10	0,88
01.07.2023	45,80	x			13:30 14:20	00:50	9,10	N	54,94	13:30 14:15	00:45	11,44
	8,70	x			15:30 18:35	03:05	0,70	N	8,55	15:45 18:30	02:45	0,77
04.07.2023	0,70	x			00:35 01:10	00:35	0,20	N	0,64	00:30 00:55	00:25	0,16
	0,60	x			13:10 13:30	00:20	0,20	N	0,64	13:10 13:25	00:15	0,16
05.07.2023	1,60		K	<3mm	23:15 23:55	07:12	0,30	NW	1,68	23:05 23:45	00:40	0,32
06.07.2023	6,40		V	<7mm	00:15 01:45	01:30	0,80	N	10,62	00:10 01:30	01:20	1,77
07.07.2023	2,10	x			04:40 07:30	02:50	0,10	N	1,88	04:30 06:55	02:25	0,16
12.07.2023	-	x			-	-	-	N	0,08	05:55 06:00	00:05	0,08
	-	x			-	-	-	N	0,08	06:25 06:30	00:05	0,08
13.07.2023	18,60	x			03:00 05:25	02:25	4,70	-	14,59	03:05 04:50	01:45	3,20
	1,10	x			13:35 15:35	02:00	0,20	N	0,32	15:05 15:40	00:35	0,16
	18,10	x			17:25 20:40	03:15	4,70	N	18,23	17:15 20:40	03:25	5,21
17.07.2023	0,80	x			13:40 14:40	01:00	0,30	N	1,76	13:30 14:00	00:30	0,80
18.07.2023	5,30		K	<7mm	17:40 19:15	01:35	1,20	SSO	4,14	17:40 19:10	01:30	0,56
19.07.2023	1,70	x			14:50 15:40	00:50	0,70	N	0,86	14:45 15:35	00:50	0,32
21.07.2023	1,60	x			05:20 05:50	00:30	0,40	N	1,68	05:20 05:45	00:25	0,40
	0,70	x			08:00 08:10	00:10	0,50	N	0,08	08:05 08:10	00:05	0,08
	25,60	x			15:45 17:10	01:25	10,10	N	29,95	15:45 17:10	01:25	10,54
22.07.2023	2,70		K	<3mm	17:05 17:55	00:50	0,40	N/NW	2,17	17:15 17:50	00:35	0,48
24.07.2023	0,20	x			21:15 21:25	00:10	0,10	N	0,08	21:15 21:20	00:05	0,08
	2,70		V	<3mm	21:55 23:50	01:55	0,30	N	2,57	22:10 23:50	01:40	0,32
25.07.2023	1,60				00:00 01:45	01:45	0,30	N	1,56	00:00 01:45	01:45	0,30
	25,90		K	>16mm	07:25 09:20	01:55	3,50	N	34,95	07:25 09:15	01:50	6,07
	0,50	x			11:35 11:55	00:20	0,20	ONO	0,24	11:40 11:50	00:10	0,08
	1,40	x			13:25 13:50	00:25	0,40	N	1,35	13:30 13:45	00:15	0,48
	2,60	x			19:05 19:25	00:20	1,30	N	1,46	19:10 19:35	00:25	0,65
	0,80	x			20:25 20:45	00:20	0,30	N	0,70	20:25 20:40	00:15	0,24
1,90	x			21:35 23:30	01:55	0,20	N	1,66	21:50 23:30	01:40	0,22	
26.07.2023	2,40	x			01:30 04:45	03:15	0,30	N	2,00	01:35 04:40	03:05	0,24
26.07.2023	0,20	x			06:15 07:10	00:55	0,10	N	0,08	06:30 06:35	00:05	0,08
	0,10	x			09:15 09:20	00:05	0,10	N	0,08	09:00 09:05	00:05	0,08
29.07.2023	0,60	x			21:50 22:30	00:40	0,20	N	0,64	21:45 22:30	00:45	0,16
30.07.2023	1,40	x			04:40 07:45	03:05	0,10	N	1,10	04:50 06:35	01:45	0,16
	29,30	x			16:20 17:30	01:10	10,00	-	25,62	16:10 17:20	01:10	11,13

Die Niederschlagsdaten des hydrografischen Dienstes und vom Wegenernet wurden miteinander verglichen.

Nach umfassender Analyse wurden die Niederschlagsdaten vom Wegenernet betrachtet und für das hydrologische Modell als Niederschlag verwendet, da sie besser zu den Messdaten passen. Die Niederschlagsdaten des Hydrografischen Datenverbands wurden als weniger repräsentativ für das Einzugsgebiet angesehen und lediglich als Quervergleich herangezogen, um etwaige unplausible Niederschläge schneller identifizieren zu können. Die Daten vom Wegenernet liegen

Methodik

näher am EZG und bieten genauere Niederschlagsdaten, die auch in den Durchflussdaten nachweislich besser widerspiegelt werden.

Vergleicht man die Aufzeichnungen der beiden Messstationen in der Tabelle 3-1, erkennt man, dass die Niederschlagsmessungen teilweise Abweichungen aufweisen. Diese können auf verschiedene Faktoren zurückgeführt werden, darunter die Distanz der beiden Betreiber zum Einzugsgebiet (EZG) sowie allgemeine Messfehler und Unplausibilitäten. Nach Implementierung der Niederschlagsdaten in PC-SWMM und durchführen von Simulationen wurden sie mit Durchflussdaten verglichen. Dabei wurden einige Ereignisse zunächst gefiltert und aufgrund von diversen Ausschlussgründen anschließend aussortiert.

Tabelle 3-2: Ausschlussgründe der Regenereignisse

Regenereignisse	Verwendung K...Kalibrierung V -Validierung	Gesamt-niederschlag pro Event	Wegernet				EHYD 5min				Grund für Ausschluss
			Gesamtniederschlag pro Event [mm/Event]	Zeitraum [hh:mm]	Regenereignisdauer [hh:mm]	Windrichtung	Gesamtniederschlag pro Event [mm/Event]	Zeitraum [hh:mm]	Regenereignisdauer [hh:mm]		
02.06.2023			1,10	12:40 13:30	00:50	N	4,54	12:40 13:05	00:25		unterschiedliche Regenmengen
			0,50	23:05 23:35	00:30	NO	0,32	22:50 23:05	00:15		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
04.06.2023	K	<16mm	10,60	15:25 17:35	02:10	N	8,13	15:35 17:30	01:55		
			11,90	19:55 22:00	02:05	N	6,52	20:05 21:45	01:40		Regendaten erhöht
05.06.2023	V	<16mm	15,70	08:10 17:55	09:45	N	15,56	08:15 17:45	09:30		
			0,80	16:45 17:20	00:35	N/ONO	11,24	16:25 21:30	05:05		unterschiedliche Regenmengen
06.06.2023	V	<7mm	6,30	17:45 21:10	03:25	N/ONO					
07.06.2023			10,90	13:20 13:55	00:35	N	0,72	13:20 13:40	00:20		unterschiedliche Regenmengen
07.06.2023			7,70	16:00 16:10	00:10	N	0,00	-	-		unterschiedliche Regenmengen
08.06.2023	K	<7mm	5,00	15:10 15:45	00:35	N	6,25	15:10 15:45	00:35		
09.06.2023			1,30	15:05 16:25	01:20	N	1,20	14:55 15:15	00:20		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
			0,10	09:15 03:20	00:05	N	-	-	-		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
10.06.2023			0,80	11:50 12:00	00:10	N	-	-	-		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
			2,70	08:10 09:15	01:05	N	0,94	08:05 08:45	00:40		
11.06.2023	K	<3mm	1,50	10:10 11:50	01:40	N	1,26	10:10 10:40	00:30		
			0,30	20:25 20:35	00:10	N	0,16	20:30 20:35	00:05		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
			0,10	04:00 04:05	00:05	N	0,08	04:00 04:05	00:05		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
			0,80	07:40 08:00	00:20	N	0,56	07:40 07:55	00:15		
14.06.2023	V	<3mm	0,10	08:45 08:50	00:05	N	0,48	08:40 08:50	00:10		
			0,20	09:35 09:40	00:05	N	0,30	09:35 09:40	00:05		
			0,40	10:25 10:35	00:10	N	-	-	-		
			0,20	12:00 12:10	00:10	NO	-	-	-		
17.06.2023			0,30	14:30 14:35	00:05	-	0,08	14:30 14:35	00:05		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
21.06.2023			0,60	20:05 21:45	01:40	NO/W/N	0,32	20:20 21:05	00:45		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
23.06.2023	K	>16mm	19,50	15:00 19:45	04:45	NNW/N	19,24	15:00 19:30	04:30		
			0,80	11:25 11:55	00:30	N	0,64	11:20 11:55	00:35		
27.06.2023	K	<3mm	1,70	12:45 13:45	01:00	N	1,28	13:05 13:45	00:40		
			0,40	16:35 17:40	01:05	-	0,40	16:35 16:45	00:10		
28.06.2023	V	<7mm	5,10	03:50 08:05	04:15	N/W/NW	4,90	04:00 07:10	03:10		
			45,80	13:30 14:20	00:50	N	54,94	13:30 14:15	00:45		Messfehler
01.07.2023			8,70	15:30 18:35	03:05	N	8,55	15:45 18:30	02:45		verfälscht vom Ereignis davor (Nachlauf des Niederschlags)
			0,70	00:35 01:10	00:35	N	0,64	00:30 00:55	00:25		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
04.07.2023			0,60	13:10 13:30	00:20	N	0,64	13:10 13:25	00:15		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
05.07.2023	K	<3mm	1,60	23:15 23:55	07:12	NW	1,68	23:05 23:45	00:40		
06.07.2023	V	<7mm	6,40	00:15 01:45	01:30	N	10,62	00:10 01:30	01:20		
07.07.2023			2,10	04:40 07:30	02:50	N	1,88	04:30 06:55	02:25		unplausibel
12.07.2023			-	-	-	N	0,08	05:55 06:00	00:05		unterschiedliche Regenmengen und Monitoring-Daten
			-	-	-	N	0,08	06:25 06:30	00:05		unterschiedliche Regenmengen und Monitoring-Daten
			18,60	03:00 05:25	02:25	-	14,59	03:05 04:50	01:45		unterschiedliche Regenmengen
13.07.2023			1,10	13:35 15:35	02:00	N	0,32	15:05 15:40	00:35		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
			18,10	17:25 20:40	03:15	N	18,23	17:15 20:40	03:25		unterschiedliche Regenmengen und Monitoring-Daten
17.07.2023			0,80	13:40 14:40	01:00	N	1,76	13:30 14:00	00:30		unterschiedliche Regenmengen
18.07.2023	K	<7mm	5,30	17:40 19:15	01:35	SSO	4,14	17:40 19:10	01:30		
19.07.2023			1,70	14:50 15:40	00:50	N	0,86	14:45 15:35	00:50		unterschiedliche Regenmengen
			1,60	05:20 05:50	00:30	N	1,68	05:20 05:45	00:25		unplausible Monitoring-Daten
21.07.2023			0,70	08:00 08:10	00:10	N	0,08	08:05 08:10	00:05		unterschiedliche Regenmengen und Monitoring-Daten
			25,60	15:45 17:10	01:25	N	29,95	15:45 17:10	01:25		Messfehler
22.07.2023	K	<3mm	2,70	17:05 17:55	00:50	N/NW	2,17	17:15 17:50	00:35		
			0,20	21:15 21:25	00:10	N	0,08	21:15 21:20	00:05		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
24.07.2023			2,70	21:55 23:50	01:55	N	2,57	22:10 23:50	01:40		
	V	<3mm	1,60	00:00 01:45	01:45	N	1,56	00:00 01:45	01:45		
	K	>16mm	25,90	07:25 09:20	01:55	N	34,95	07:25 09:15	01:50		
			0,50	11:35 11:55	00:20	ONO	0,24	11:40 11:50	00:10		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
			1,40	13:25 13:50	00:25	N	1,35	13:30 13:45	00:15		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
			2,60	19:05 19:25	00:20	N	1,46	19:10 19:35	00:25		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
			0,80	20:25 20:45	00:20	N	0,70	20:25 20:40	00:15		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
			1,90	21:35 23:30	01:55	N	1,66	21:50 23:30	01:40		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
			2,40	01:30 04:45	03:15	N	2,00	01:35 04:40	03:05		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
26.07.2023			0,20	06:15 07:10	00:55	N	0,08	06:30 06:35	00:05		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
			0,10	09:15 09:20	00:05	N	0,08	09:00 09:05	00:05		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
29.07.2023			0,60	21:50 22:30	00:40	N	0,64	21:45 22:30	00:45		kleines Verhältnis Abfluss zu Trockenwetterabfluss
30.07.2023			1,40	04:40 07:45	03:05	N	1,10	04:50 06:35	01:45		keine Messdaten
			29,30	16:20 17:30	01:10	-	25,62	16:10 17:20	01:10		Messfehler

Ausschlussgründe sind:

- Messfehler
- Unplausibilität – Unplausible Regendaten bzw. Durchflussdaten, die nicht nachvollziehbar sind.
- Kleines Verhältnis zwischen Abfluss und Trockenwetterabfluss – Geringe Niederschlagsereignisse, die in den Durchflussdaten kaum erkennbar sind.
- Unterschiedliche Regenmengen – Regenereignisse, die nicht gemessen werden können oder bei denen die Durchflussdaten keinen Niederschlag anzeigen, obwohl im Einzugsgebiet nachweislich Niederschlag aufgetreten ist, werfen Fragen auf. Es könnte darauf hindeuten, dass die Regenmessstationen den Niederschlag nicht erfasst haben, obwohl tatsächlich welcher gefallen ist. Möglich ist auch, dass zwischen den beiden Betreibern unterschiedliche Regenmengen erfasst wurden. Darüber hinaus könnten andere Einleitungen in den Regenkanal, wie zum Beispiel Feuerwehrübungen oder Autowäschen, zu erhöhten Durchflussdaten führen.

Wenn man die Tabelle 3-1 genauer betrachtet, fällt auf, dass im Bereich der Messstation im Norden (Bundesministerium, 2023) das Regenereignis teilweise früher einsetzt, wie beispielsweise am 04.06.2023 und 05.07.2023. Die Windrichtung wird von Time and Date (Time and Date AS, 2023) bereitgestellt und zeigt größtenteils einen Wind aus nördlicher Richtung an. Dies bestätigt die Zeitdifferenz zwischen dem Eintritt des Regens und den Durchflussdaten, da die Messstation im Norden in der Regel zuerst Niederschlag erfasst, weil der Regen dort auch früher eintrifft.

Auch sind die Niederschlagsmengen in der Tabelle 3-1 teilweise sehr unterschiedlich. Das ist an den Ereignistagen 06.06.2023 und 07.06.2023 sehr gut zu erkennen.

Letztendlich sind alle zur Kalibrierung und Validierung verfügbaren Niederschlagsereignisse nachfolgend in der Tabelle 3-3 angeführt. Zusammenfassend kann man sagen, dass insgesamt 15 Ereignisse als Niederschlagsereignisse für die Kalibrierung und Validierung nach der Aussortierung (vgl. Tabelle 3-2) zur Verfügung stehen.

Diese Ereignisse sind in vier Kategorien unterteilt, und zwar in Ereignisse bis 3mm, bis 7mm, bis 16mm und größer 16mm. Je nach Kategorie sind die Ereignisse annähernd gleichmäßig aufgeteilt. Insgesamt stehen 15 Regenereignisse für die Kalibrierung und Validierung zur Verfügung. Die Kalibrierungsereignisse sind in blau und mit dem Buchstaben „K“ gekennzeichnet. Die Validierungsereignisse sind in grün und mit dem Buchstaben „V“ gekennzeichnet.

Tabelle 3-3: Kategorisierung und Verteilung der Niederschlagsereignisse für Kalibrierung und Validierung im Einzugsgebiet von Feldbach.

Gesamtniederschlag pro Event [mm/Event]	Gesamtanzahl	Aufteilung nach Ausschluss	
		K	V
<3mm	6	4	2
<7mm	5	2	3
<16mm	2	1	1
>16mm	2	2	0

Summe: **15**

Die Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse sind in dem Unterkapitel 4.1 bzw. 4.2 zu finden.

3.4.4 Bodenparameter

3.4.4.1 Infiltrationsmethode

Um den Prozess der Bodeninfiltration zu beschreiben, wird das mathematische Modell der Green-Ampt-Infiltration verwendet.

Diese Methode zur Infiltrationsmodellierung basiert auf der Annahme, dass sich in der Bodensäule eine deutliche Benetzungsfront befindet, die den Boden mit einem gewissen anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt unten von dem gesättigten Boden darüber trennt. Die benötigten Eingabeparameter umfassen das anfängliche Feuchtigkeitsdefizit (Anfangsdefizit) des Bodens, die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens und dem Matrixpotenzial (Saugwirkung) an der Benetzungsfront. Die Geschwindigkeit, mit der sich das Feuchtigkeitsdefizit während trockener Perioden erholt, steht empirisch in Zusammenhang mit der hydraulischen Leitfähigkeit (Rossmann, 2015).

3.4.4.2 Parameterwahl

Die Teileinzugsflächen wurden in SWMM integriert und in folgende Typen eingeteilt:

- Versiegelt
- Gebäude
- Grünfläche

Am 07.07.2023 wurden vom Institut der Siedlungswasserwirtschaft vor Ort Infiltrationsmessungen gemäß ÖNORM EN ISO 22282-5 durchgeführt. Eingesetzt wurden dabei Doppelringinfiltrimeter. Vor Ort wurden signifikante Stellen gewählt, die das EZG Feldbach gut repräsentieren. In der Abbildung 3-6 sind die gewählten Messstellen M1 bis M7 als braune Kreuze zu sehen.

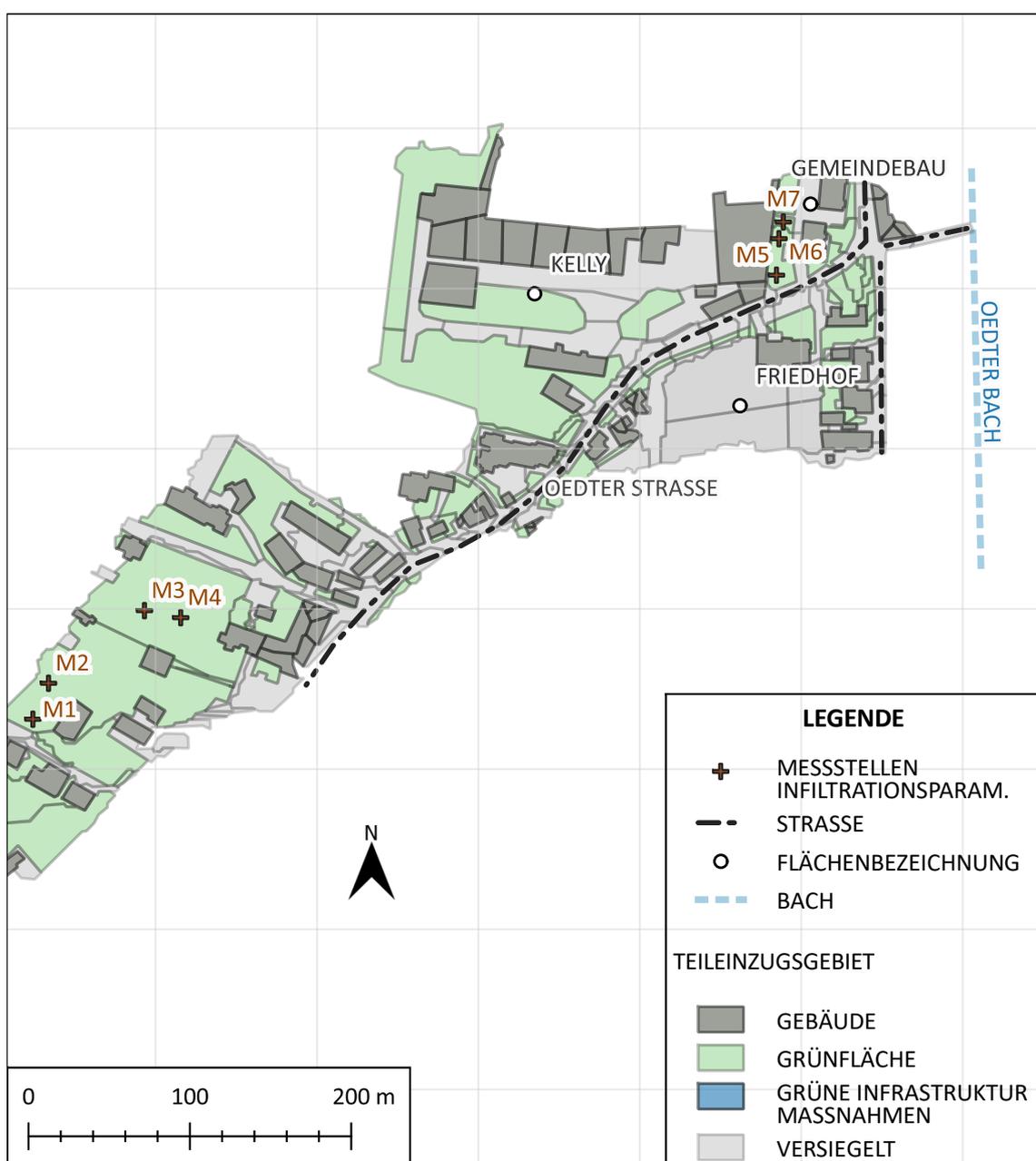


Abbildung 3-6: Darstellung der Stellen, an denen die Infiltrationsraten gemessen wurden.

Die Grünflächen wurden nochmals unterteilt, da verschiedene Infiltrationswerte im Einzugsgebiet gemessen und erwartet wurden.

Die Auswertung wird in folgender Tabelle 3-4 präsentiert.

Tabelle 3-4: Auswertung der Infiltrationsraten an den gemessenen Stellen.

Bodenparameter		
Messstellen	Infiltrationsrate	
	[mm/min]	[mm/h]
M1	0,66	39,6
M2	1,22	73,2
M3	0,24	14,28
M4	0,06	3,6
M5	5,20	312
M6	2,91	174,6
M7	4,89	293,4

Zu erkennen ist, dass die Infiltrationsrate bei den Messstellen M5 bis M7 sehr hoch ist. Die Werte variieren zwischen 174,6mm/h und 312mm/h. Für das Modell wurde in diesem Bereich ein durchschnittlicher Wert von 200mm/h angenommen.

Die Messstellen M1 und M2 befinden sich auf einer ehemaligen Deponie einer Textilfabrik und zeigen ein Gefälle in Richtung der Punkte M3 und M4. Die Infiltrationsraten mit 39,6mm/h (M1) und 73,2mm/h (M2) zeigen dort ebenfalls einen erhöhten Wert an. Die Messstellen M3 und M4 liegen jedoch in einem flachen Gelände und zeigen mit 14,28mm/h und 3,6mm/h eine sehr niedrige Infiltrationsrate.

Allgemein ist zu erwähnen, dass es am Tag davor geregnet hat und der Boden dementsprechend gesättigt war. Dies ist daher gut, da die ausgewerteten Daten repräsentativ sind und nicht durch lange Dürren und Trockenheit verfälscht worden sind.

Die Infiltrationswerte [mm/h] wurden in den gemessenen Messstellen entsprechenden der Tabelle 3-4 in die Modellierung mit hineingenommen. Alle anderen Infiltrationswerte entlang des EZG wurden mit 40mm/h und 70mm/h angenommen und versucht, ein möglichst realistisches Modell anzunehmen.

3.4.5 Verdunstung

Um Verdunstung in der Wasserbilanz berücksichtigen zu können, werden auch Klimadaten im Modell mitberücksichtigt. Daher wird für die Simulation der Verdunstung eine spezifische Klimadatei erstellt, die Informationen wie Stationsnamen, Jahr, Monat, Tag sowie die Höchst- und Mindesttemperatur für jeden Tag enthält. Die Klimadatei hat auch eine Spalte für die Verdunstung und eine Spalte

für den Wind. Da diese Daten nicht verfügbar sind, wird ein Stern „*“ als Platzhalter angegeben (PCSWMM Support, 2023a).

Diese Daten werden auch hier vom WegenerNet (Fuchsberger et al., 2023) bereitgestellt. Diese externe Datei wurde dann in das Programm PC-SWMM integriert, um die Verdunstung basierend auf den Temperaturdaten zu simulieren.

Im folgenden Auszug aus der Tabelle 3-5 ist ein kleiner Ausschnitt dieser Datei dargestellt.

Tabelle 3-5: Ausschnitt der zehnjährigen Klimadaten für das EZG Feldbach, die für die Langzeitsimulation verwendet wurden

Station	YYYY MM DD	Max. Temp.	Min. Temp.	Verdunstung	Wind
61	2011 01 01	-3,27	-7,64	*	*
61	2011 01 02	-2,39	-8,57	*	*
61	2011 01 03	2,70	-10,04	*	*
61	2011 01 04	-3,19	-11,04	*	*
61	2011 01 05	-4,05	-5,92	*	*
61	2011 01 06	-0,54	-8,58	*	*
61	2011 01 07	11,34	-4,72	*	*
61	2011 01 08	13,63	-1,17	*	*
61	2011 01 09	14,21	-2,19	*	*
61	2011 01 10	2,72	-0,67	*	*
.					
.					
.					

3.5 Trockenwetterabfluss

Bei der Analyse der Durchflussdaten, die vom 31.05.2023 bis 31.07.2023 gemessen wurden, kommt heraus, dass der Trockenwetterabfluss im Juni mit ca. 2,00l/s größer ist, als der Trockenwetterabfluss im Juli, der nur ca. 0,90l/s ausmacht. Nach Niederschlagsereignissen kann man auch erkennen, dass der Abfluss auf 0,00l/s hinuntergeht und dann plötzlich schlagartig wieder auf 2,00l/s springt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass vor dem Oedterbach eine Rückstauklappe installiert ist, die dafür zuständig ist, dass das Wasser aus dem Bach nicht in den Kanal zurückgespült wird (Büsch Technology GmbH, 2023). Dies ist besonders dann wichtig, wenn der Wasserstand im Gewässer höher ist als im Kanal, wie beispielsweise bei starken Regenfällen oder Hochwasser. Auf Basis der zweimonatigen Durchflussmessungen wurde ein Trockenwetterabfluss von 1,50 l/s gewählt, da dies in etwa dem Durchschnitt der zweimonatigen Daten entspricht.

3.6 Simulationseinstellungen

Vor dem Start einer Simulation in PC-SWMM müssen verschiedene Einstellungen vorgenommen werden. Dazu gehören die Wahl der Berechnungsmethode für den Abfluss, der Infiltrationsmethode, des Simulationszeitraumes sowie die Festlegung von Aufzeichnungs- und Berechnungszeitschritten für trockenes Wetter und Regenwetter sowie das Abflussgeschehen im Kanalnetz. Es gehören auch die Gleichung für Druckleitungen sowie die Kriterien des Normalabflusses gewählt. Diese Einstellungen beeinflussen die Rechenzeit, die Größe der Ausgabedatei und das Ergebnis. Die Wahl der genannten Einstellungen ist in der Tabelle 3-6 angegeben.

Tabelle 3-6: Gewählte Einstellungen für die Simulation

Simulationseinstellungen		
Optionen	Modell IST-Zustand	Modell GI-Maßnahmen
Infiltrationsmodell	Green-Ampt	Green-Ampt
Abflusstransportmethode	Dynamisch	Dynamisch
Simulationszeitraum	31.05.2023 - 26.07.2023	01.01.2011 - 31.12.2020
Aufzeichnungszeitschritt	2min	2min
Berechnungszeitschritt für den Oberflächenabfluss im Trockenwetterfall	60min	60min
Berechnungszeitschritt für den Oberflächenabfluss im Regenwetterfall	2min	2min
Berechnungszeitschritt des Abflussgeschehens im Kanalnetz	10s	10s
Gleichung für Druckleitungen	Darcy-Weisbach	Darcy-Weisbach
Kriterium des Normalflusses	Gefälle & Froude-Zahl	Gefälle & Froude-Zahl

Wichtig zu erwähnen ist, dass sich die Werte, die in PC-SWMM in einem Diagramm oder Profil dargestellt werden, von denen in einem Statusbericht unterscheiden. Diese Diskrepanz resultiert aus den unterschiedlichen Aufzeichnungszeitschritten im Vergleich zu den Berechnungszeitschritten, wie bereits in Tabelle 3-6 dargestellt wurde. Dabei werden die Statistiken, die mit dem Aufzeichnungszeitschritt von 120s berechnet sind, durch lineare Interpolation zwischen den Datenpunkten gemäß dem festgelegten Aufzeichnungszeitschritt berechnet. Die Statistiken des Statusberichtes stützen sich auf interne Berechnungen und verwenden ein Berechnungszeitintervall von 10 Sekunden und sind somit genauer (PCSWMM Support, 2024a).

3.7 Kalibrierung und Validierung

Zwischen Modellergebnissen und tatsächlichen Messdaten entstehen aufgrund von Vereinfachungen und Unsicherheiten Differenzen. Um diese Differenzen zu minimieren, müssen Kalibrierungen am Modell durchgeführt werden. Unterschie-

den wird zwischen Modellparametern und Systemgrößen. Während Systemgrößen als messbare, „fixe“ Größen anzusehen sind (z. B. Querschnittsabmessungen, Gefälle von Kanalhaltungen, Netztopologie), sind die Modellparameter jene, die bei einer Kalibrierung erkannt und verändert werden können (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Muschalla et al., 2015).

Laut dem Regelblatt 11 des ÖWAV sollten für die Kalibrierung mindestens drei Regenereignisse betrachtet werden, wobei zur Validierung, insbesondere bei großen Einzugsgebieten, als Mindestanforderung zwei weitere Ereignisse sinnvoll (OEWAV, 2009) wären. Allgemein ist es ratsam und sinnvoll, so viele Ereignisse wie möglich für die Modellkalibrierung und -validierung zu verwenden.

Um ein Niederschlags-Abfluss-Modell kalibrieren zu können, sind zeitgleiche Messungen von Niederschlag und Durchfluss im Entwässerungssystem erforderlich. Dabei sollten die Niederschlagsmessstelle idealerweise nah oder direkt im betrachteten EZG liegen, da Niederschlagsintensitäten und -mengen bei bereits geringen Entfernungen variieren (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Muschalla et al., 2015). Ziel jeder Kalibrierung ist, dass durch Anpassungen der Modellparameter eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen Modellsimulation und dem tatsächlichen IST-Zustand besteht, wobei eine komplette Übereinstimmung nicht möglich ist. Auf folgende Kenngrößen kann kalibriert werden:

- Gesamtvolumen des Abflusses bei einem Ereignis
- Spitzenabfluss
- Durchschnittlicher Abfluss
- Zeitpunkt der Abflussspitze
- Form und Verlauf der Abflussgang- und Abflusssummenlinie
- Ganglinienfehler (Standardabweichung der Differenz pro Zeitschritt)

Welche dieser Kenngrößen für die Kalibrierung herangezogen werden, hängen tatsächlich von der Aufgabenstellung ab. Außerdem ist je nach Aufgabenstellung die Wichtung der Kenngrößen unterschiedlich.

Differenzen bzw. Abweichungen sollten durch Überprüfung der Niederschlagsereignisse auf mögliche Fehler zunächst in den Systemgrößen, aber auch Messfehlern, analysiert werden. Danach können die Modellparameter kalibriert werden, um eine bestmögliche Übereinstimmung zu erzielen (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Muschalla et al., 2015).

Wie in Unterkapitel 1.1 bereits erklärt, konzentriert sich die Kalibrierung darauf, die hydrologischen Prozesse abzustimmen und möglichst genau darzustellen, jedoch nicht notwendigerweise die Abflussdynamik zu modellieren. Insbesondere wird hinsichtlich quantitativer Abflussparameter wie dem Abflussvolumen und der

Abflussspitze kalibriert. Zusätzlich wurde der durchschnittliche Abfluss mitberücksichtigt. Die Vorgehensweise der Kalibrierung, Validierung und der anschließenden Langzeitsimulationen werden nachfolgend im Unterkapitel 3.7 erklärt. Die Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung können ab dem Unterkapitel 4.1 betrachtet werden.

3.7.1 Kalibrierung

Die Kalibrierung der Modellparameter erfolgte mit dem SRTC-Tool, das vom Programm PC-SWMM bereitgestellt wird. Es wurde über Sensitivitäten über das Tool SRTC von PCSWMM kalibriert. Zur Beurteilung der Modellgüte im linearen Modell wird in dieser Masterarbeit das Bestimmtheitsmaß R^2 sowie die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl. Mean Square Error oder kurz RMSE) herangezogen. Das RMSE dimensionslos wird neben dem RMSE ebenfalls verglichen.

Einzelne Parameter werden innerhalb eines Unsicherheitsbandes angepasst, um die Bestimmtheitsmaße (R^2) und die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) der Gesamtabflüsse, der Abflussspitzen und der durchschnittlichen Durchflüsse zu verbessern.

Das Bestimmtheitsmaß (R^2) in der linearen Regression bewertet die Anpassungsgüte zwischen Modell und Daten. Es variiert zwischen 0 und 1, wobei Werte nahe 1 eine starke Korrelation und Werte nahe 0 eine schwache Korrelation anzeigen. R^2 ermöglicht Vorhersagen basierend auf der Modellwahrscheinlichkeit, wobei eine ausreichende Datenmenge für Genauigkeit erforderlich ist. Das Fehlermaß RMSE liegt immer zwischen Null und Unendlichkeit. Der beste Wert, den man für den RMSE erhalten kann, ist 0, da alle Punkte genau auf einer Linie mit positiver Steigung 1 liegen. Das RMSE dimensionslos liegt ebenfalls zwischen Null und Unendlichkeit. Ein kleinerer Wert näher an Null deutet auf ein besseres Modell hin (PCSWMM Support, 2024b).

3.7.1.1 SRTC-Tool von PC-SWMM

Das SRTC-Tool, das ein Werkzeug von PC-SWMM ist, bedeutet übersetzt Sensitivitätsbasierte Radio Kalibrierung (Sensitivitybased Radio Tuning Calibration). Es dient der Kalibrierung eines Modells anhand beobachteter Daten oder der Überprüfung der Sensitivität von Parametern. Der Nutzer kann zunächst die Parameter (Teileinzugsgebiete, Kanalrohre, Schächte, usw.) unter Berücksichtigung einer zulässigen Parametervariation definieren. Nach Festlegung der Parametervariationen ermöglicht ein Werkzeug-Fenster dem Benutzer die beobachteten und berechneten Zeitreihen in Grafiken darzustellen. Das Werkzeug führt SWMM5-Läufe mit hohen und niedrigen Werten der festgelegten Parametervariation durch, um Toleranzgradienten für jeden Parameter zu generieren. Das Tool bietet außerdem Diagramme für maximale, durchschnittliche und Gesamtniederschläge mit einer Fehleranzeige an. Mit Hilfe der Radioschieberegler am unteren

Rand des Fensters gestattet das Tool dem Nutzer den Parameterwert innerhalb des vordefinierten Toleranzbereichs zu variieren und das Modell bestmöglich zu kalibrieren. Wenn die Fehlerquote zufriedenstellend ist, speichert PC-SWMM ein neues Modell mit den neukalibrierten Parametern, basierend auf den Positionen der Schieberegler (PCSWMM Support, 2023c). Die gewählten Parametervariationen und Kalibrierungsparameter sind in Tabelle 3-7 angeführt. Welche Parametervariationen und mit welcher Begründung diese gewählt sind, werden im nachfolgendem Unterkapitel erklärt. Als Ziel für R^2 ist 95% in dieser Masterarbeit angesetzt.

3.7.1.2 Kalibrierungsparameter

Um den Abfluss von Regenwasser simulieren zu können, werden einige Eingangsdaten, die für die Modellerstellung verwendet werden, benötigt (vgl. 3.1).

Die Eingangsdaten und Parameter können somit auch mit vielen Unsicherheiten verbunden sein. Umso wichtiger ist es, alle Eingangsparameter zu kennen, um Fehler bzw. Unsicherheiten zu erkennen und zu minimieren. Je besser man über die relevanten Eingangsparameter Bescheid weiß, desto besser können Ergebnisse einer Modellsimulation interpretiert werden (Deletic et al., 2012). Die wesentlichen Unsicherheitsfaktoren können folgendermaßen unterteilt werden:

- **Eingangsdaten:** Unsicherheiten in den Eingangsdaten können beispielsweise Abweichungen bei der Messung des Niederschlags oder Annahmen von Modellparametern umfassen.
- **Kalibrierungsdaten:** Hier können Unsicherheiten in Form von Messfehlern auftreten, beispielsweise bei Durchflussmessungen, die später für die Kalibrierung verwendet werden.
- **Modellstruktur:** Unsicherheiten in der Modellstruktur entstehen durch Vereinfachungen oder Fehler bei der Erstellung des Modells durch die Modellierenden.

Überall wo Annahmen getroffen werden, können Unsicherheiten auftreten. So auch beispielsweise bei den Annahmen der Infiltrationsparameter in den Bereichen des EZG, wo keine Messungen durchgeführt wurden.

Des Weiteren wurde bei Begehungen im EZG erkannt, dass nicht alle Dachflächen mit dem Regenkanal direkt verbunden sind. Das gibt eine erhebliche Unsicherheit, welchen Dachfläche tatsächlich direkt ableiten und welche Dachflächen auf die Grünfläche ableiten. Ebenso ist es schwer zu erraten, ob die gesamte Dachfläche in einen Schacht ableitet, oder ob möglicherweise die Dachfläche geteilt wird und in zwei Schächte ableitet, wie es bei Satteldächern der Fall sein könnte.

Andere relevanten Unsicherheiten werden in der folgenden Tabelle 3-1 aufgelistet. Mögliche Unsicherheiten der Teileinzugsgebiete sind die Neigung der Flächen, die Rauigkeit der Flächen, der tatsächliche Versiegelungsgrad, der Oberflächenspeicher bzw. Muldenverlust und die erwähnten Infiltrationsparameter der Green-Ampt-Methode. Eine mögliche Unsicherheit des Kanals ist die Rauigkeit und der Rauigkeitsparameter, der je nach Material des Kanals variieren kann.

Anhand der in Tabelle 3-7 angegebenen Modellunsicherheiten kann im Anschluss im Programm PC-SWMM die Kalibrierung mit dem SRTC-Tool durchgeführt werden.

Tabelle 3-7: Tabelle der möglichen Modellunsicherheiten für die Kalibrierung mit dem SRTC-Tool

Kalibrierung - SRTC Parameter			
Kalibrierungsparameter	Parameter	Parametervariation Spannweite [%]	Parametervariation gewählt [%]
Teileinzugsgebiet	Abflussbreite	±50-100	±50
	Neigung	±10-100	±50
	Versiegelungsgrad	±25-50	±20
	Rauigkeit versiegelt	±10-25	±25
	Rauigkeit Durchlässig	±50-100	±75
	Oberflächenspeicher versiegelt	±25-50	±50
	Oberflächenspeicher Durchlässig	±50-100	±50
	Sofortabflussanteil	±50-100	±50
	Matrixpotenzial (Saugwirkung)	±25-50	±50
	Hydraulische Leitfähigkeit	±25-50	±50
Anfangsdefizit	±50-100	±50	
Kanalrohr	Rauigkeit	±5-10	±20

Die zu kalibrierenden Parameter (Spalte 2) und Spannweiten (Spalte 3) sind Werte, die von der Support-Homepage von PCSWMM (PCSWMM Support, 2023d) als Empfehlung angegeben sind. Einzig die Rauigkeit wurde beispielsweise mit ±20% etwas größer angenommen. Die Spalte 4 zeigt die tatsächliche Parametervariation, die für die Kalibrierung verwendet wird.

Während des Kalibrierungsprozesses mit dem SRTC-Tool werden die Einstellungen der Regler angepasst, um die im Modell verwendeten Größen an die tatsächlichen Beobachtungen anzupassen. In Spalte 3 von Tabelle 3-8 sind die endgültigen prozentualen Änderungen der einzelnen zu kalibrierenden Parameter bzw. Modellunsicherheiten angeführt, die eine zufriedenstellende Kalibrierung, also ein Bestimmtheitsmaß von mind. 95%, für das spezifische Modell ermöglichen. Die Ausgangswerte für die Basisparameter "Teileinzugsgebiet" und "Kanalrohr" finden sich in den Spalten 4 bis 7. In Tabelle 3-9 werden hingegen die absoluten Parameterwerte nach der Kalibrierung in den Spalten 3 bis 6 dargestellt.

Die Ergebnisse der Kalibrierung sind in dem Unterkapitel 4.1 dargestellt.

Tabelle 3-8: Übersicht der Basiswerte für die jeweiligen Parameterschwerpunkte „Teileinzugsgebiet“ und „Kanalrohr“

Basis - Parameter Teileinzugsgebiete und Kanalsystem						
Parameterschwerpunkt	Parameter	Anpassung Schieberegler [%]	Parameterwerte			
			Teileinzugsgebiet			Kanalrohr
			Gebäude	Versiegelt	Grünfläche	
Teileinzugsgebiet	Breite [m]	+35	6,93 -133,94	2,83 - 125,24	4,47 - 143,834	-
	Neigung [%]	+10	60; 100	3,00; 4,00; 5,00	3,00; 4,00; 20,00	-
	Versiegelungsgrad [%]	0	100	60; 100	1,00	-
	Rauigkeit Versiegelt [-]	0	0,012	0,012	0,012	-
	Rauigkeit Durchlässig [-]	-20	0,01	0,15	0,15	-
	Oberflächenspeicher Versiegelt [mm]	-50	1,40	1,40; 2,00	2,00	-
	Oberflächenspeicher Durchlässig [mm]	0	1,40	4,0	4,0	-
	Sofortabflussanteil [%]	+30	50,00	25,00	25,00	-
	Matrixpotential (Saugwirkung) [mm]	0	55	55	55	-
	Hydraulische Leitfähigkeit [mm/h]	0	40	40	3,3; 14; 20; 40; 70; 75; 100; 140; 200	-
	Anfangsdefizit [-]	0	0,368	0,368	0,368; 0,463	-
Kanalrohr	Rauigkeit [-]	-100				0,013

Tabelle 3-9: Übersicht der Parameterwerte nach der Kalibrierung für die jeweiligen Parameterschwerpunkte „Teileinzugsgebiet“ und „Kanalrohr“

Kalibrierung - SRTC Parameter					
Parameterschwerpunkt	Parameter	Parameterwerte			Kanalrohr
		Teileinzugsgebiet			
		Gebäude	Versiegelt	Grünfläche	
Teileinzugsgebiet	Breite [m]	8,143 -157,38	3,325 - 147,157	4,07 - 169,867	-
	Neigung [%]	63; 100	3,15; 4,20; 5,25	3,15; 4,20; 21	-
	Versiegelungsgrad [%]	100	60; 100	1,00	-
	Rauigkeit Versiegelt [-]	0,012	0,012	0,012	-
	Rauigkeit Durchlässig [-]	0,009	0,13	0,13	-
	Oberflächenspeicher Versiegelt [mm]	1,12	1,12; 1,60	1,6	-
	Oberflächenspeicher Durchlässig [mm]	1,40	4,0	4,0	-
	Sofortabflussanteil [%]	75	37,5	37,5	-
	Matrixpotential (Saugwirkung) [mm]	55	55	55	-
	Hydraulische Leitfähigkeit [mm/h]	40	40	3,3; 14; 20; 40; 70; 75; 100; 140; 200	-
	Anfangsdefizit [-]	0,368	0,368	0,368; 0,463	-
Kanalrohr	Rauigkeit [-]				0,011

3.7.2 Validierung

Durch die Validierung kann man sicherstellen, dass das kalibrierte Modell eine zuverlässige Vorhersagegenauigkeit aufweist und für die Untersuchung der geplanten Szenarien geeignet ist. Auch für die Validierung wurde das Bestimmtheitsmaß von mindestens 95% als besonders gute Fehlerquote angenommen. Wie in Tabelle 3-3 angegeben, sind für die Validierung des hydrologischen Modells des IST-Zustandes sechs Niederschlagsereignisse herangezogen worden. Im Unterkapitel 4.2 sind die drei Validierungsergebnisse, also die Validierung des Modells nach Abflussspitze, nach Gesamtabfluss und nach durchschnittlichem Abfluss, dargestellt.

3.8 Blau-grüne Infrastruktur Maßnahmen

Für den Vergleich zwischen dem aktuellen Zustand des Modells (IST-Zustand) und dem Zustand mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur wird eine Kopie der Modelldatei des IST-Zustands erstellt. In dieser Kopie werden die neuen BGI-Maßnahmen implementiert.

3.8.1 Kennzeichnung der BGI-Maßnahmen und Maßnahmenpakete

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, werden neue TEZG mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur nicht einfach über bereits existierende gelegt. Stattdessen werden die neuen Flächen an den richtigen Stellen eingefügt und die

bestehenden TEZG des Modells des IST-Zustandes angepasst, um Überlappungen zu vermeiden. Dies ist wichtig, da sonst Flächen doppelt gezählt werden, was zu falschen Ergebnissen führen würde, da somit doppelt viel Wasser vom Boden aufgenommen und abgeleitet wird.

Eine grafische Darstellung des Einzugsgebietes, der BGI-Maßnahmen, die effektiv Niederschlags- und Oberflächenwasser behandeln sollen, sowie die Verbindung zu den jeweiligen Kanalsträngen werden in der Abbildung 3-7 dargestellt, um die räumliche Organisation und die Implementierung der Maßnahmen zu veranschaulichen.

Das Einzugsgebiet wird in vier Teilflächen bzw Teilgebiete unterteilt, wobei in jeder Teilfläche unterschiedliche Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (BGI) umgesetzt werden. Die Maßnahmen der BGI werden somit als Maßnahmenpakete zusammengefasst, die im Anschluss an den nahegelegenen Kanalstrang verbunden sind, um das gesammelte Regenwasser entsprechend zu behandeln. Diese Maßnahmen dienen dazu, Regenwasser effektiv zu bewirtschaften und die Belastung der Kanalisation zu reduzieren. Um die Teilflächen, dessen BGI-Maßnahmen und die einzelnen Kanalstränge leichter zu identifizieren, werden sie folgendermaßen gekennzeichnet:

Teilfläche – Bauteil – Nummerierung

Die vier Teilflächen umfassen folgende Gebiete:

- Gemeindebau mit „GB“,
- Freidhof mit „FH“,
- Kelly mit „KLY“ und
- die Flächen vorm Oedterbach mit „OB“.

Als „Bauteil“ ist die Unterscheidung zwischen Kanalstrang mit „KS“ und der jeweiligen BGI-Maßnahme gemeint. Die BGI-Maßnahmen umfassen die Sickermulde mit „SM“, die vegetative Mulde mit „VM“, die Regenmulde mit „RM“ und die sickerfähigen Parkplätze mit „SfP“.

- Die in Blau gekennzeichnete Teilfläche beinhaltet den Umbau im Bereich des „Gemeindebau“. Dort sind insgesamt vier Sickermulden (GB-SM-1 bis GB-SM-4) als BGI-Maßnahmen implementiert, die in die Kanalstränge GB-KS-1 bis GB-KS-4 einleiten. GB-KS-2 und GB-KS-3 verlaufen parallel. Das Wasser aus GB-KS-1 und GB-KS-4 wird im gemeinsamen Schacht zwischen den beiden Strängen zusammengeführt, ehe das Wasser dann aus diesem Schacht in die beiden Kanalstränge GB-KS-2 und GB-KS-3 geteilt in Richtung Oedterbach weiterfließt. Der gemeinsame Schacht der vier Kanalstränge ist als blauer Punkt im Gemeindebau dargestellt.

- In Grün ist die Teilfläche des „Kelly“ gekennzeichnet, in der sich zwei Sickermulden (KLY-SM-1 und KLY-SM-2) befinden, die in den Kanalstrang KLY-KS-1 einleiten.
- In Lila ist die Teilfläche des „Friedhof“ dargestellt. Da befinden sich drei Sickermulden (FH-SM-1; FH-SM-2; FH-SM-3), sowie drei sickerfähige Parkplätze (FH-SfP-1; FH-SfP-2; FH-SfP-3). Sie alle leiten in die nahegelegenen Kanalschächte verteilt ein. Ausgewertet wird in Unterkapitel 4.5.1 der Kanalstrang FH-KS-1 ein, da in diesem alle BGI-Maßnahmen bereits das Wasser entsprechend behandelt haben.
- In Rot ist die Teilfläche des „Oedterbach“ gekennzeichnet, in der sich zwei vegetative Mulden (OB-VM-1 und OB-VM-2) befinden, die in die BGI-Maßnahme Regenmulde (OB-RM-1) einleiten.

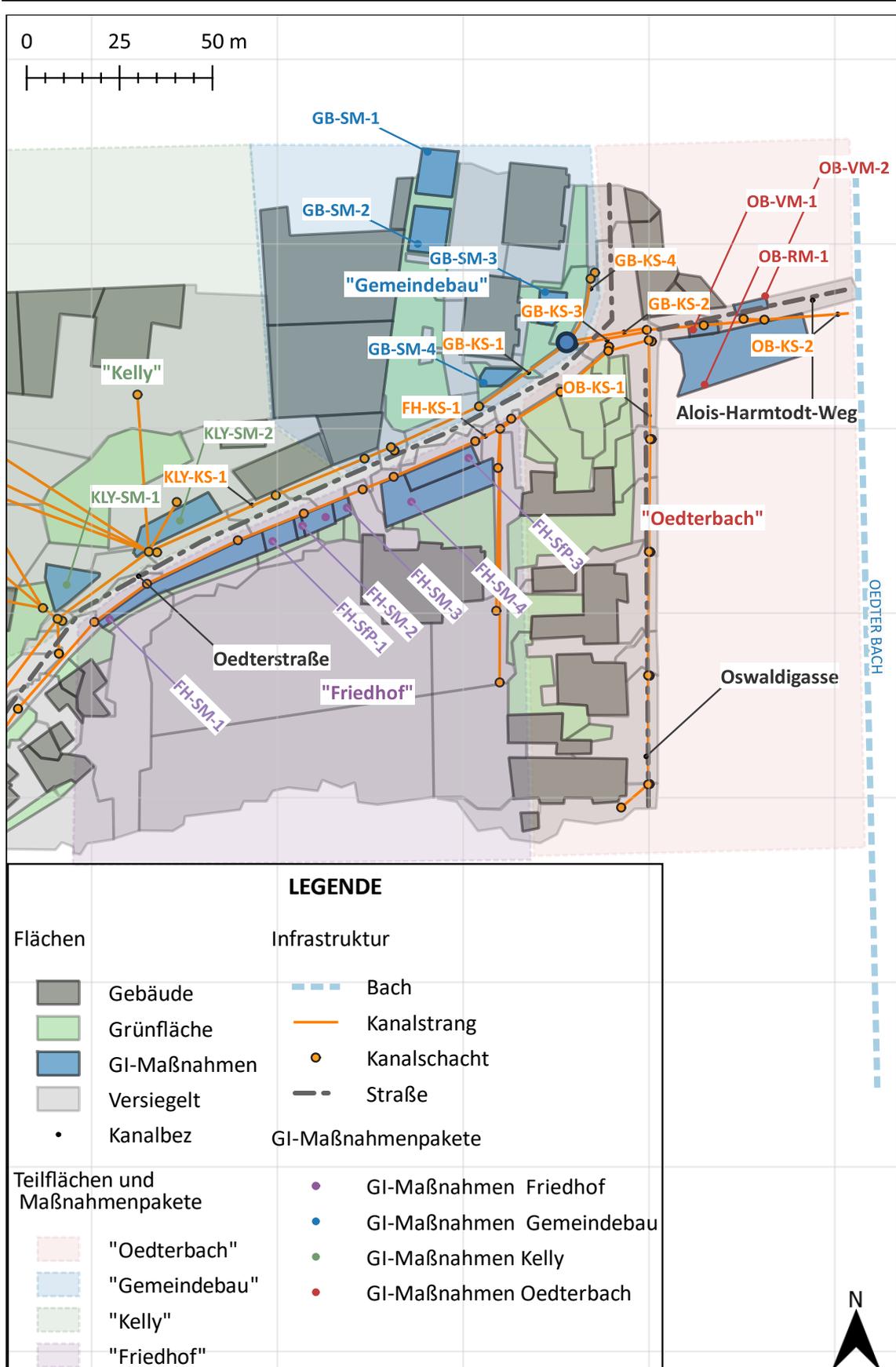


Abbildung 3-7: Darstellung der BGI-Maßnahmen im EZG Feldbach aller Maßnahmenpakete sowie der dazugehörigen Teilflächen der einzelnen Maßnahmenpakete

3.8.2 Parameterwahl der BGI-Maßnahmen

Bei der Wahl der Parameter für die Maßnahmen der BGI wird das SWMM-Manual (Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality) als grober Anhaltspunkt herangezogen (Rossmann, 2016). Dort ist ein grober Wertebereich aller Maßnahmen angegeben. Für die Wahl der Parameter werden schlussendlich verschiedene Studien bzw. schriftliche Untersuchungen herangezogen. Die Referenzen dieser Studien sind in der Tabelle 3-11 in der letzten Spalte zu entnehmen.

Die Tabelle 3-10 zeigt die Übersicht der Bodenschichten, die verwendet werden, um verschiedene Arten von Maßnahmen der BGI im Programm SWMM zu modellieren („x“ bedeutet „erforderlich“, „o“ bedeutet „optional“). Wie bereits in 2.3.2 beschrieben, werden für die Implementierung der BGI-Maßnahmen die in PC-SWMM zur Verfügung gestellten BGI-Maßnahmen-Elemente „Permeable Pavement“, „Vegetative Swale“, „Bio-Retention Cell“ und „Rain Garden“ verwendet. In der Tabelle sind die einzelnen Bodenschichten dargestellt, die für die jeweilig gewählten BGI-Maßnahmen modelliert werden können. Diese sind auf Grundlage der Vorgaben der Planung und der Planungskonzepte vorgegeben.

Tabelle 3-10: Übersicht der Bodenschichten, die verwendet werden, um verschiedene Arten von Maßnahmen der BGI zu modellieren (Rossmann, 2015, mod.).

Maßnahmen GI	Oberfläche	Belag	Bodenschicht	Speicherschicht	Drainage	Drainagematte
Sickermulde	x		x	o	o	
Regengarten	x		x			
Begrüntes Dach	x		x			x
Versickerungsfähiger Belag	x	x	o	x	o	
Versickerungsgraben	x			x	o	
Regentonne				x	x	
Dachentwässerungstrennung	x				x	
Vegetative Mulde	x					

Beispielsweise zählt zu den BGI-Maßnahmen der Verdunstung das Verdunstungsbecken, das in der Tabelle 3-10 als „Vegetative Mulde“ übersetzt ist und in PC-SWMM als „Vegetative Swale“ für die Modellierung zur Verfügung steht. Das BGI-Element wird deswegen in PC-SWMM gewählt, da die Maßnahme beim Oedterbach lediglich der Verdunstung dienen soll und laut Planung lediglich die Oberfläche als Aufbau hat. So werden auch gewissenhaft für die restlichen BGI-Maßnahmen der Versickerung die PC-SWMM zur Verfügung gestellten BGI-Maßnahmen-Elemente verwendet.

Die Tabelle 3-11 zeigt zusammengefasst die einzelnen Parameterwerte der zur Modellierung zur Verfügung gestellten BGI-Maßnahmen-Elemente.

Tabelle 3-11: Übersicht Parameterwahl der Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (Yang et al. 2023; McCuen et al. 2002; LID control editor 2023; Rawls et al. 1983; James et al. 2010)

Parameterwahl Maßnahmen der grünen Infrastruktur							
PC SWMM Objekt	Parameter	Einheit	Veg. Mulde	Sicker mulde	Versickerungsfähiger Parkplatz	Regengarten	Quelle
Oberfläche	Bermenhöhe	mm	300	300	0	300	lt. Planung
	Vegetationsanteil	-	0.93	0.12	-	0.1	(Yang et al., 2023)
	Rauhigkeit nach Manning [-]	-	0.15	0.15	-	0.12	(Yang et al., 2023); (McCuen et al., 2002)
	Gefälle	%	1	1	-	0	Annahme
	Bermenseitengefälle (1:x)	-	3	-	-	-	(Yang et al., 2023)
Belag	Schichtstärke	mm	-	-	100	-	(Yang et al., 2023)
	Porenanteil	-	-	-	0.21	-	(LID control editor, 2023)
	Versiegelungsanteil	-	-	-	0	-	(LID control editor, 2023)
	Durchlässigkeit	mm/h	-	-	66	-	(Yang et al., 2023)
	Kolmationsfaktor	-	-	-	0	-	(LID control editor, 2023)
Boden	Schichtstärke	mm	-	300	0	300	lt. Planung
	Porosität	-	-	0.453	-	0.453	(Yang et al., 2023)
	Feldkapazität	-	-	0.19	-	0.19	(Rawls et al., 1983); lt. Feldmessung
	Welkepunkt	-	-	0.085	-	0.085	(Rawls et al., 1983); lt. Feldmessung
	hydraulische Leitfähigkeit	mm/h	-	10.92	-	200	(Rawls et al., 1983); lt. Feldmessung
	Leitfähigkeitsgefälle	-	-	10	-	10	(LID control editor, 2023)
	Saughöhe	mm	-	109.98	-	55	(Rawls et al., 1983); lt. Feldmessung
Speicher	Schichtstärke	mm	-	300	350	0	(Yang et al., 2023)
	Porenanteil	-	-	0.45	0.45	-	(Yang et al., 2023)
	Filtrationsrate	mm/h	-	36	36	-	(Yang et al., 2023)
	Kolmationsfaktor	-	-	0	0	-	(LID control editor, 2023)
Drainage	Drainagekoeffizient	-	-	50.59	50.59	-	(James et al., 2010)
	Drainageexponent	-	-	0.5	0.5	-	(James et al., 2010)
	Drainagenversatz	mm	-	140	190	-	(James et al., 2010)

Ein höherer Vegetationsanteil von 93% ist in der Tabelle 3-11 ersichtlich. Dies erhöht die Verdunstung und fördert die Absorption von Oberflächen- und Niederschlagswasser durch die Pflanzen. Durch diesen hohen Vegetationsanteil entsteht auch eine größere Benetzungsfläche, was bedeutet, dass mehr Fläche für die Wasseraufnahme zur Verfügung steht.

3.9 Langzeitsimulation

Nach zufriedenstellender Validierung wird eine zehnjährige Langzeitsimulation des Modells des IST-Zustandes durchgeführt. Die Niederschlagsdaten werden ebenso vom WegenerNet (Station 61) zur Verfügung gestellt und die Daten reichen vom 01.01.2011 bis zum 01.01.2021 (Fuchsberger et al., 2023). Nach der Implementierung aller BGI-Maßnahmen wird auch eine Langzeitsimulation des Modells mit BGI-Maßnahmen durchgeführt.

Aus den Niederschlagsdaten geht hervor, dass in der zehnjährigen Langzeitsimulation 442 Niederschlagsereignisse stattfinden. Laut dem Hochwasserbericht „Juli und August 2020“ (Schatzl, 2024) ist ein Ereignis, das am 22. August 2020 stattfand, ein Extremereignis gewesen. Die Abbildung 3-8 zeigt die Gesamtniederschlagssummen für das Ereignis am 22.08.2020, wobei an der Station Feldbach 86 mm Niederschlag in nur einer halben Stunde registriert wurden, dies entspricht einer Niederschlagsjährlichkeit $\gg 100$ (Schatzl, 2024).

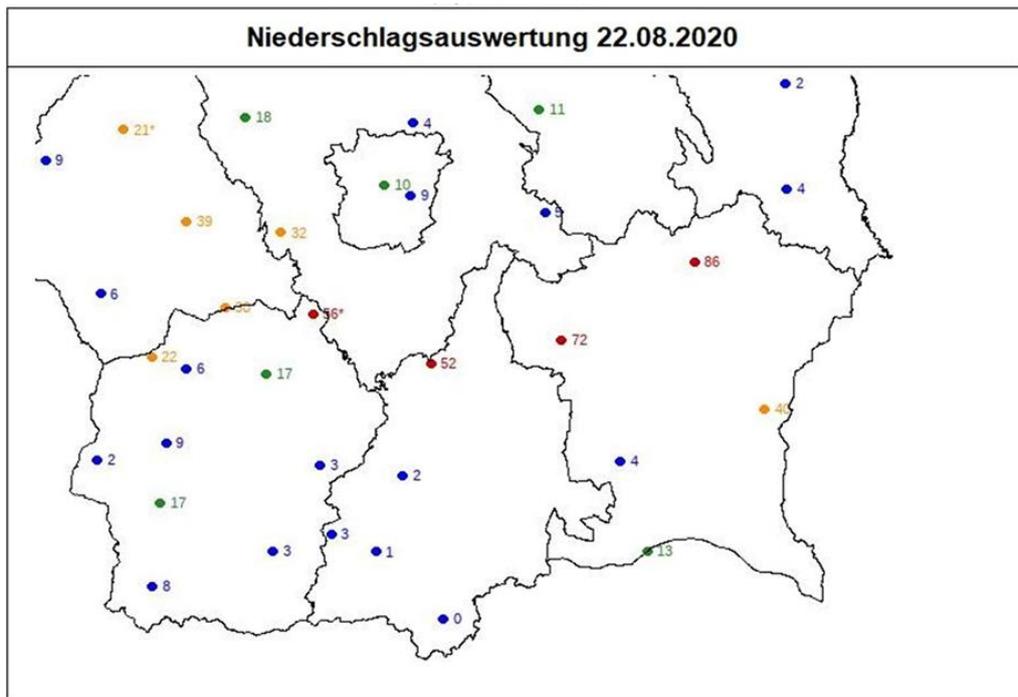


Abbildung 3-8: Gesamtniederschlagssummen im Bereich Feldbach für das Ereignis am 22.08.2020 (Schatzl, 2024).

Die Summenlinie des Niederschlags an der Station Feldbach ist in Abbildung 3-9 zu sehen.

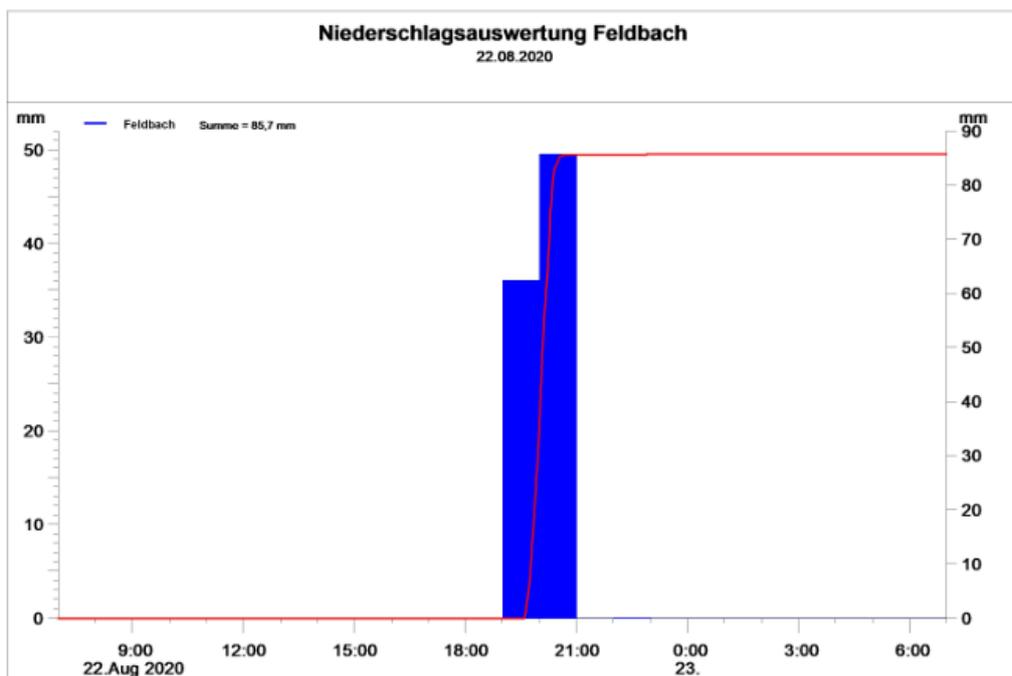


Abbildung 3-9: Niederschlagsverhalten an der Station Feldbach am 22.08.2020 (Schatzl, 2024).

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Kalibrierung (vgl. 4.1) und der Validierung (vgl. 4.2) beschrieben und diskutiert. Anschließend werden Auswertungen des gesamten Einzugsgebiets beschrieben (vgl. 4.3). Darüberhinaus wird die Wirksamkeit der wasserwirtschaftlichen Schwerpunkte (vgl. 4.4) beschrieben, gefolgt von der Analyse der einzelnen Maßnahmenpakete (vgl. 4.5).

4.1 Modellkalibrierung

Wie schon im Unterkapitel 3.7 erwähnt, liegt der Schwerpunkt der Kalibrierung hauptsächlich auf der Kenngröße des Gesamtvolumens, des durchschnittlichen Abflusses und der Abflussspitzen. Nachfolgend werden die Kalibrierungsergebnisse anhand dieser Kenngrößen dargestellt und beschrieben. Dargestellt werden die Ergebnisse als Punktwolkendiagramme, wobei auf der X-Achse das simulierte Modell des IST-Zustandes und auf der Y-Achse die gemessenen Durchflussdaten gegenübergestellt sind. Die Durchflussdaten der X-Achse stammen von Messungen am Schacht „Messstation“ (vgl. 3.4.2), während die Modelldaten auf der Y-Achse von den kalibrierten und simulierten Modelldaten des Programms PC-SWMM stammen, ebenso vom Schacht „Messstation“. Auf den Abbildungen ist die Winkelhalbierende in einer durchgezogenen schwarzen Linie zu erkennen, sowie gestrichelte, graue Abweichungslinien von $\pm 10\%$.

Die Fehlermaßauswertung der Kalibrierungen und Validierungen können der Tabelle 4-1 entnommen werden.

Tabelle 4-1: Auswertung der Fehlermaße

	Fehlermaße								
	R ²			RMSE			RMSE dimensionslos		
	unkal. Modell	kal. Modell	val. Modell	unkal. Modell	kal. Modell	val. Modell	unkal. Modell	kal. Modell	val. Modell
Abflussspitze	0,937	0,981	0,772	26,2	14,3	16,6	0,221	0,121	0,279
Gesamtabfluss	0,992	0,991	0,996	26500	29300	8980	0,102	0,112	0,0444
durchschn. Abfluss	0,997	0,998	0,992	2,36	2,08	0,616	0,0831	0,0734	0,0554

Abgebildet sind die Fehlermaße R², RMSE und RMSE dimensionslos. Diese sind jeweils für alle Abflussparameter abgebildet. Unterschieden wird jeweils zwischen unkalibriertem Modell, kalibriertem Modell und zuletzt dem validierten Modell. Man erkennt, dass bereits das unkalibrierte IST-Modell sehr gute Bestimmtheitsmaße von 93,7% bis 99,7% aufweist, durch die Kalibrierung hingegen alle Abflussparameter größer 98,1% liegen. Lediglich nach der Validierung kommt bei der Abflussspitze ein R² von lediglich 77,2% heraus. Die RMSE dimensionslos zeigen ebenfalls sehr gute Ergebnisse mit Werten sehr nahe der Null (0,0444 und 0,0554), lediglich ist auch hier die Abflussspitze mit 0,279 ein schlechteres Ergebnis zu sehen. Nachfolgend werden die Punktwolkendiagramme der Kalibrierung und Validierung dargestellt.

4.1.1 Kalibrierung - Gesamtabfluss

Die folgende Abbildung 4-1 zeigt eine Gegenüberstellung der Gesamtabflussdaten. Die Einheit ist in Kubikmeter [m³] angegeben. Die Punkte liegen größtenteils entlang der Winkelhalbierenden, was auf eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Werten hinweist. Die Streuung der Punkte verdeutlicht jedoch, dass diese größtenteils innerhalb der Grenzen der Abweichungslinien liegen. Das Punktwolkendiagramm bestätigt die Kalibrierungsergebnisse der jeweiligen Fehlermaße aus der Tabelle 4-1, dass das kalibrierte Modell eine präzise Vorhersage des Gesamtabflusses liefert, wobei die Ereignisse innerhalb akzeptabler Abweichungen liegen. Diese Ergebnisse stützen die Wirksamkeit der Kalibrierung und die Zuverlässigkeit des Modells bei der Simulation des Abflussverhaltens.

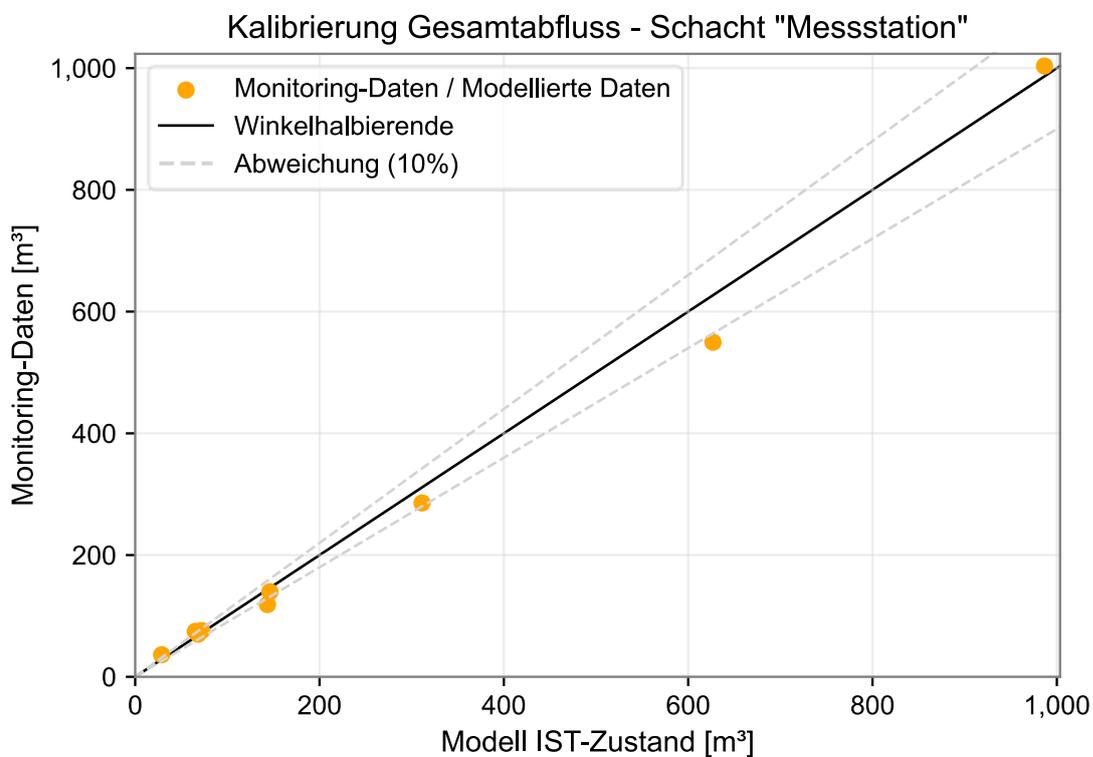


Abbildung 4-1: Darstellung ausgewählter Ereignisse für die Kalibrierung des Gesamtabflusses im Schacht „Messstation“ in Kubikmeter [m³]

4.1.2 Kalibrierung - durchschnittlicher Abfluss

Die Abbildung 4-2 zeigt, dass auch bei der Kalibrierung des durchschnittlichen Abflusses die Punkte größtenteils entlang der Winkelhalbierenden liegen, was auf eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Werten hinweist. Lediglich zwei Datenergebnisse liegen äußerst knapp außerhalb der Abweichungslinien. Die Kalibrierungsergebnisse der jeweiligen Fehlermaße für den durchschnittlichen Abfluss aus der Tabelle 4-1 deuten auf die Effektivität der Kalibrierung und die Verlässlichkeit des Modells bei der Simulation des durchschnittlichen Abflusses hin.

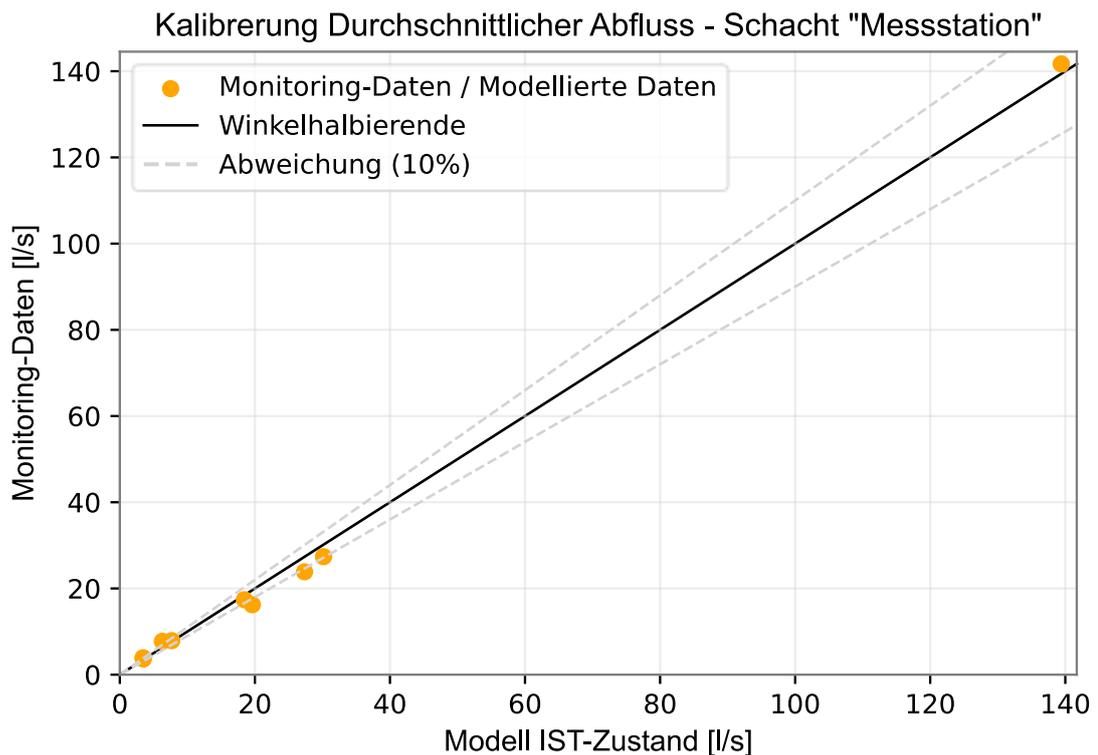


Abbildung 4-2: Darstellung ausgewählter Ereignisse zur Kalibrierung des durchschnittlichen Abflusses im Schacht „Messstation“ in Liter pro Sekunde (l/s)

4.1.3 Kalibrierung - Abflussspitze

Die Abbildung 4-3 zeigt, dass die Punkte bei Abflussspitzen größer 150l/s alle ziemlich genau entlang der Winkelhalbierenden liegen, was auf eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Werten hinweist. Die Punkte kleiner 150m³/s sind zumeist oberhalb der Winkelhalbierenden. Dies deutet darauf hin, dass eine größere Abflussspitze in diesem Bereich im Modell simuliert wird. Diese Abweichung könnte auf Unsicherheiten zurückgeführt werden, wie bereits in 3.7.1.2 erläutert. Vermutlich bezieht sich diese Unsicherheit darauf, welche Dachflächen direkt mit dem Regenkanal verbunden sind und welche nicht. Bei geringen Niederschlagsereignissen, die zu Abflussspitzen von weniger als 150l/s führen, wird ein Großteil des Niederschlags über einen direkteren Weg in den Kanal geleitet. Bei größeren Niederschlagsereignissen wird diese Tendenz jedoch ausgeglichen, und die Punkte liegen wieder näher an der Winkelhalbierenden. Hier ist der Boden vermutlich so gesättigt, dass ein großer Teil schnell zum Kanal fließt. Es wäre daher möglich gewesen, einzelne Dach- oder Straßenflächen umzuleiten und stattdessen auf Grünflächen abzuleiten, um dem Problem entgegenzuwirken. Die Kalibrierungsergebnisse der jeweiligen Fehlermaße aus der Tabelle 4-1 zeigen ebenfalls sehr gute Ergebnisse (R^2 mit 0,998 und RMSE dimensionslos mit 0,121)

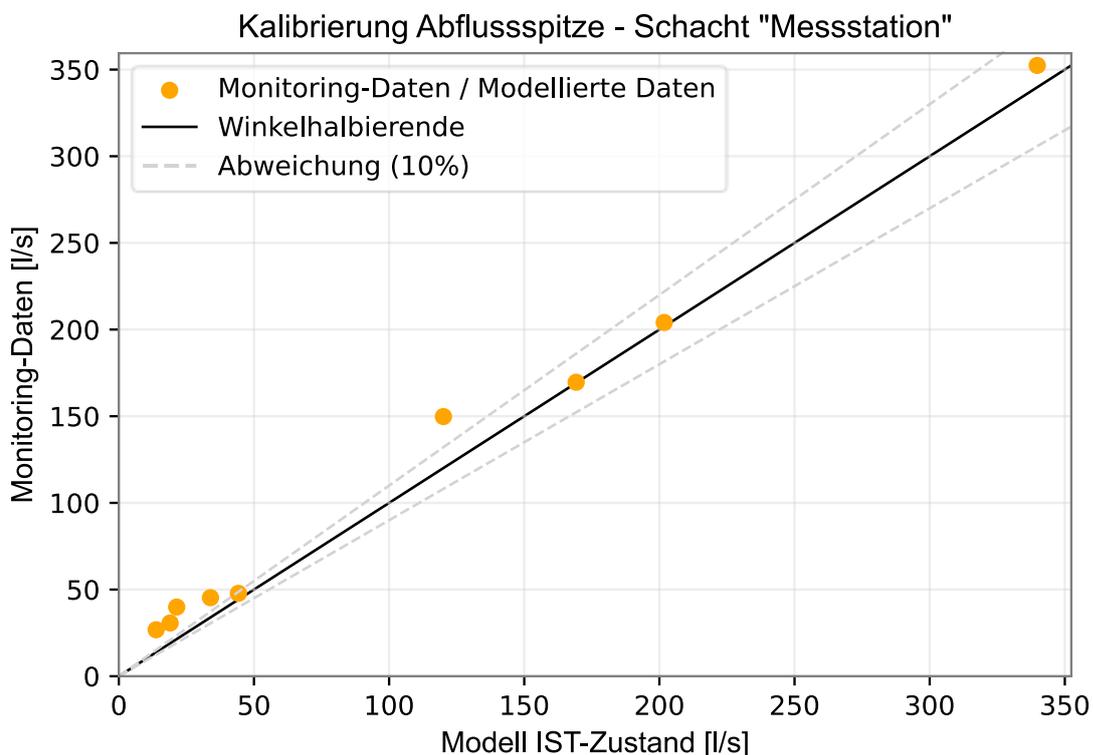


Abbildung 4-3: Darstellung ausgewählter Ereignisse für die Kalibrierung der Abflussspitze im Schacht „Messstation“ in Liter pro Sekunde [l/s]

4.2 Modellvalidierung

Allgemein ist die Validierung in einem Niederschlags-Abfluss-Modell ein entscheidender Schritt, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Modells zu überprüfen. Durch die Validierung werden die kalibrierten Modellergebnisse anhand von tatsächlichen Messdaten überprüft, um sicherzustellen, dass das Modell realitätsgetreu und präzise die hydrologischen Prozesse im betrachteten Gebiet wiedergibt.

Wie in Unterkapitel 4.1 bereits beschrieben, werden auch bei der Validierung die Ergebnisse als Punktwolkendiagramme dargestellt, wobei auf der X-Achse das simulierte Modell des IST-Zustandes und auf der Y-Achse die gemessenen Durchflussdaten gegenübergestellt sind. Auch auf diesen Grafiken der Validierung ist die Winkelhalbierende in einer durchgezogenen schwarzen Linie zu erkennen, sowie gestrichelte Abweichungslinien von $\pm 10\%$.

4.2.1 Validierung - Gesamtabfluss

Die Abbildung 4-4 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Gesamtabflussdaten, da alle Punkte nahe der Winkelhalbierenden und innerhalb der Abweichungslinien liegen. Dies bestätigt das Vertrauen in die Fähigkeit des Modells, den Gesamtabfluss gut zu simulieren. Die Validierungsergebnisse für den Gesamtabfluss zeigen ebenfalls gute Ergebnisse, mit einem R^2 von 0,996 und einem RMSE dim. von 0,044 (vgl. Tabelle 4-1).

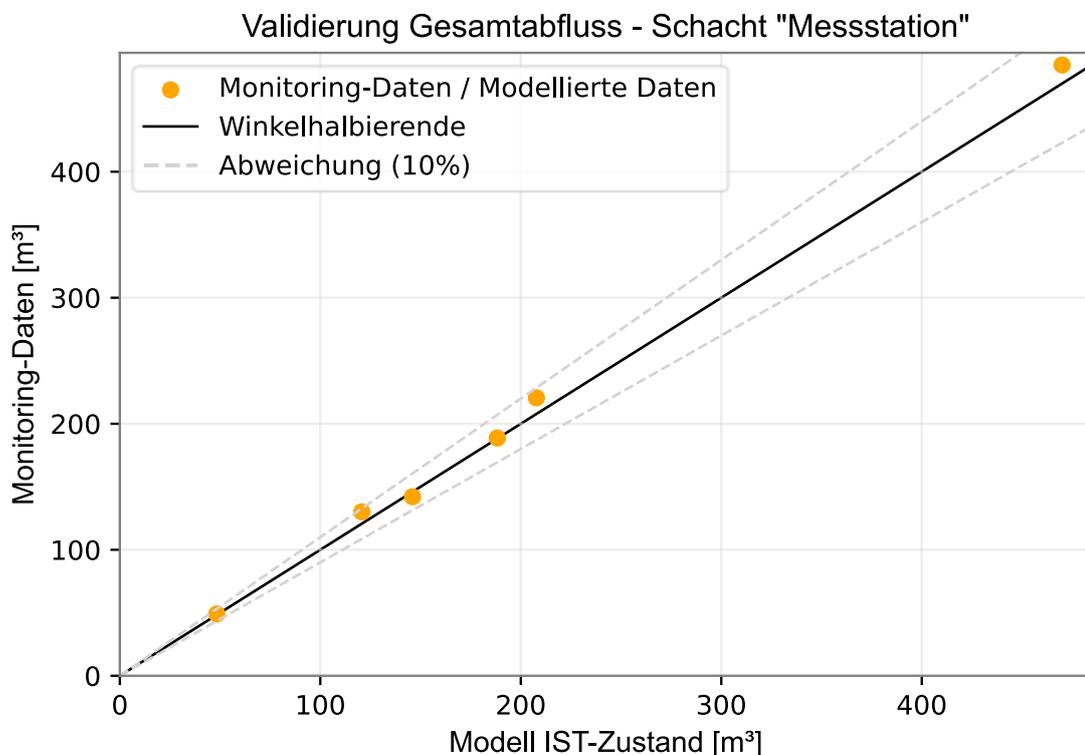


Abbildung 4-4: Darstellung ausgewählter Ereignisse für die Validierung des Gesamtabflusses im Schacht „Messstation“ in Kubikmeter [m³]

4.2.2 Validierung - durchschnittlicher Abfluss

Die Abbildung 4-5 zeigt die Validierung zwischen gemessenen und simulierten Durchschnittsabflussdaten, die in Kubikmeter [m³] angegeben sind. Zu sehen ist, dass alle Punkte zumeist entlang der Winkelhalbierenden und innerhalb der Abweichungslinien liegen. Die Abbildung und die Validierungsergebnisse der Fehlermaße aus der Tabelle 4-1 deuten auf eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Daten. Dieses Ergebnis bestätigt die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Modells bei der Simulation des durchschnittlichen Abflusses im Vergleich zu den Durchflussdaten. Dies stärkt das Vertrauen in die Ergebnisse und Prognosen des Modells.

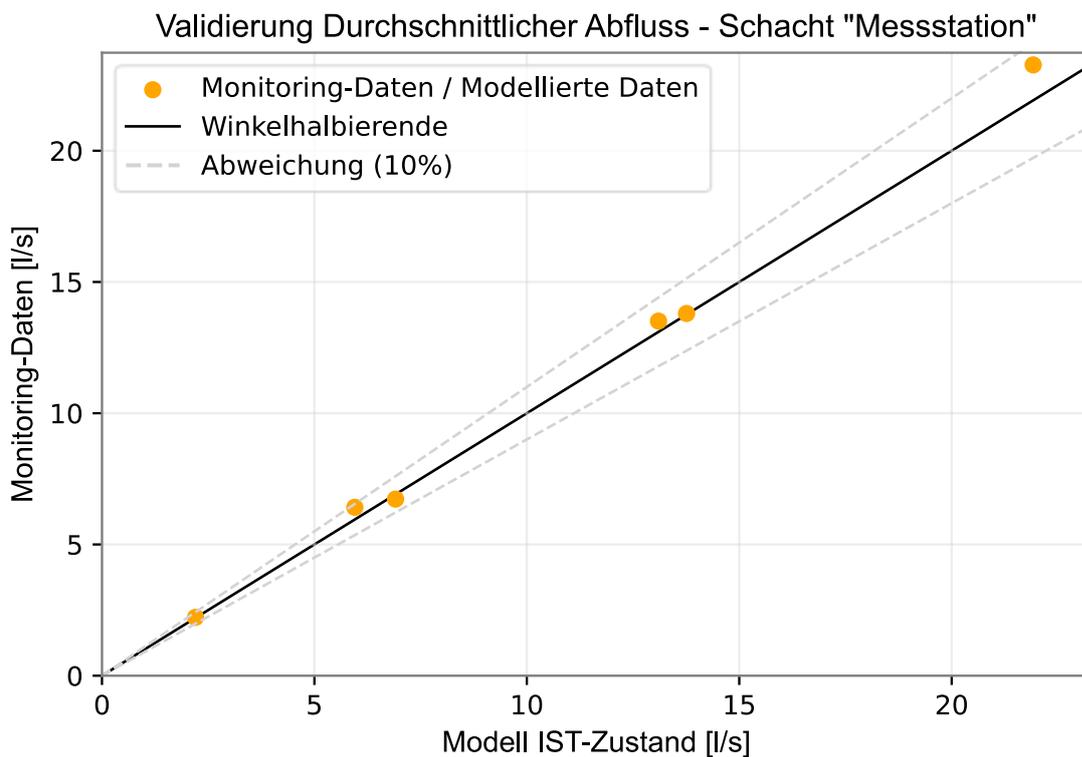


Abbildung 4-5: Darstellung ausgewählter Ereignisse zur Validierung des durchschnittlichen Abflusses im Schacht „Messstation“ in Liter pro Sekunde (l/s)

4.2.3 Validierung - Abflussspitze

Wie auch bei der Kalibrierung der Abflussspitze bestätigen sich auch hier größere Streuungen der Daten zwischen den gemessenen und modellierten Daten. Somit ist zu sagen, dass die Abflussspitzen des Modells eine geringere Genauigkeit liefern als in der realen Situation. Da sich die Abflussspitzen der Niederschlagsereignisse, die für die Validierung verwendet werden, allesamt unter 150l/s befinden, sind auch in der Abbildung 4-6 die Datenpunkte über der Winkelhalbierenden. Somit bestätigt sich auch hier das Problem, dass im Modell mehr Niederschlagswasser direkt im Regenkanal ankommt, als es tatsächlich in der realen Situation der Fall ist. Die Validierungsergebnisse der Fehlermaße der Tabelle 4-1

mit R^2 von 0,772 und RMSE dim. mit 0,279 bestätigen das schlechtere Ergebnis der Abbildung 4-6.

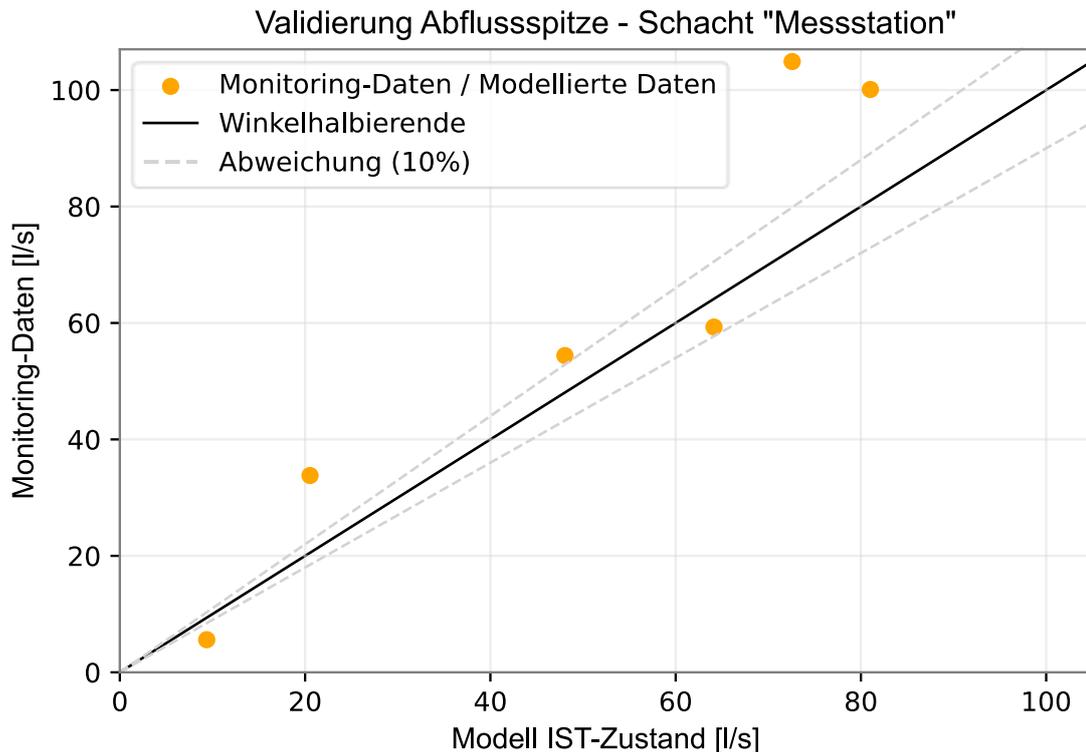


Abbildung 4-6: Darstellung ausgewählter Ereignisse für die Validierung der Abflussspitze im Schacht „Messstation“ in Liter pro Sekunde [l/s]

Sowohl die Punktwolkendiagramme als auch die Auswertung der Fehlermaße zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der relevanten Abflussparameter. Lediglich die Abflussspitzen haben eine größere Streuung (vgl. Tabelle 4-1). Dies unterstreicht die insgesamt gute Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Modells. Das Modell des IST-Zustandes ist in der Lage, die hydrologischen Prozesse im betrachteten Gebiet realitätsgetreu und zufriedenstellend präzise abzubilden.

4.3 Auswertungen des gesamten Einzugsgebietes

Um Schlussfolgerungen über die Wirksamkeit der Maßnahmen und ihr Verbesserungspotenzial zu ziehen, werden die beiden Modelle sowie ihre zehnjährigen Simulationsdaten miteinander verglichen. Diese Analysen ermöglichen es, Aussagen über die Effektivität aller Maßnahmen zu treffen. Dabei wird das Modell des IST-Zustandes mit dem Modell mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur verglichen. Die folgenden Modellvergleiche sind zumeist nach den gleichen Merkmalen aufgebaut. Orangefarbene Balken, Linien und Diagramme repräsentieren das Modell des IST-Zustandes. Grüne Balken, Linien und Diagramme sind hingegen Merkmale des Modells mit den Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (BGI). Die Auswertungsdaten stammen aus den beiden Modellen und sind das Ergebnis von der zehnjährigen Langzeitsimulation, die für beide Modelle

durchgeführt werden. Die Darstellung aller BGI-Maßnahmen sowie der dazugehörigen Teilflächen der einzelnen Maßnahmenpakete im EZG Feldbach sind bereits in der Abbildung 3-7 beschrieben und dargestellt. Die Ziele für die Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur sind bereits im Unterkapitel 1.1 beschrieben und werden nun im folgenden Unterkapitel genauer analysiert. Folgende Grafiken werden herangezogen, um die Wirksamkeit der BGI-Maßnahmen darzustellen.

- Balkendiagramme für Vergleiche beider hydrologischen Modelle (IST-Modell und BGI-Modell)
- Abflussüberschreitungskurven

Grafiken der Abflussüberschreitungskurven zeigen die kumulative Dauer, in der bestimmte Abflusswerte überschritten werden. Dabei werden wieder die zwei relevanten Modelle gegenübergestellt, das Modell des IST-Zustandes und das Modell mit Maßnahmen der BGI. Die X-Achse repräsentiert die Zeitüberschreitung in Stunden [h], während die Y-Achse den Durchfluss in Litern pro Sekunde [l/s] angibt. Die Kurven zeigen, wie sich die Abflussmengen ändern und wie oft bestimmte Durchflusswerte während eines bestimmten Zeitraums überschritten werden. Durch die logarithmische Skalierung der X-Achse werden kleinere Zeitüberschreitungen deutlicher dargestellt, während größere Zeitüberschreitungen komprimiert dargestellt sind.

Insgesamt ermöglichen diese Abflussüberschreitungsanalysen und Auswertungen einen visuellen Vergleich zwischen dem aktuellen Modell des IST-Zustandes und dem Modell mit Maßnahmen der BGI. Sie helfen dabei zu verstehen, wie sich die Maßnahmen auf die Abflussmuster auswirken. Ein positives Ergebnis zeigt sich, wenn die grüne Linie, die das Maßnahmenmodell repräsentiert, unterhalb der orangefarbenen Linie liegt, die den IST-Zustand darstellt. Dies legt nahe, dass die Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur wirksam sind, um den Abfluss zu reduzieren oder die Häufigkeit und Intensität von Überflutungen zu verringern.

- Wasserstandauswertung

Die folgenden Wasserstandauswertungen zielen darauf ab, ein detailliertes Verständnis für die Kapazitätsgrenzen der individuellen BGI-Maßnahmen zu gewinnen. Die Auswertungen sollen den erhöhten Durchfluss in den Kanalabschnitten erklären, die bereits in den Unterkapiteln 4.7.2 bis 4.6.1 gezeigt sind. Auf der X-Achse sind die zehn Jahre dargestellt, die simuliert sind. Auf der Y-Achse ist der Wasserstand der jeweiligen Maßnahme in Millimeter [mm] dargestellt, der sich nach und nach in einem Niederschlagsereignis aufsummiert. Das Wasser staut sich je nach Maßnahme entweder im Speicher oder auf der Oberfläche bis zur Bermenoberkante bzw. Geländeoberkante an. Die Daten stammen von der zehnjährigen Langzeitsimulation.

4.3.1 Auswertung des gesamten Abflusses am Kanalauslass beim Oedterbach

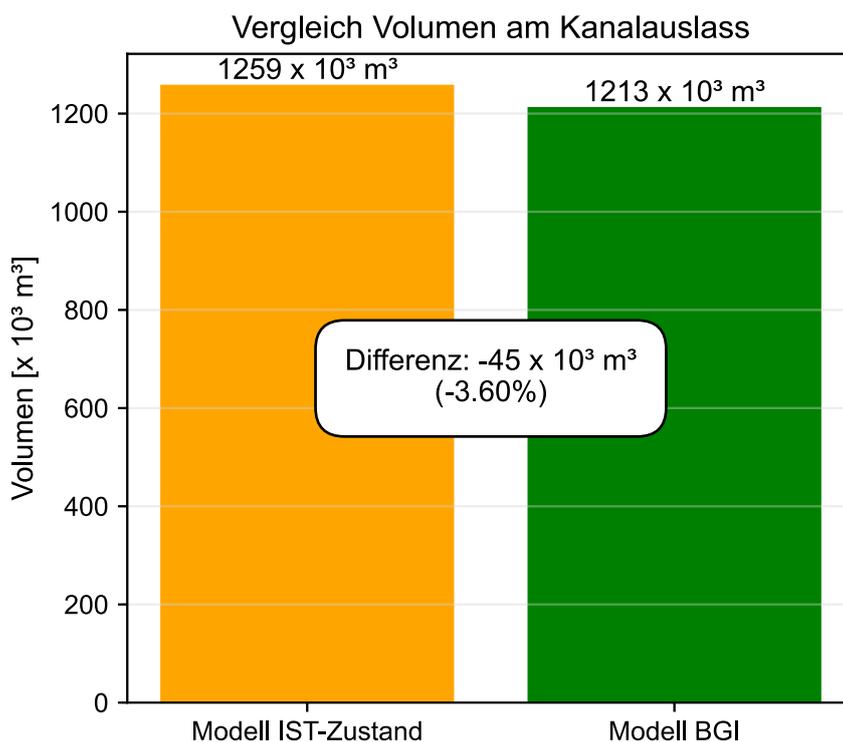


Abbildung 4-7: Übersicht Gesamtabfluss am Kanalauslass vor dem Oedterbach

In dieser Abbildung 4-7 wird am letzten Knoten bzw. Schacht, der sich vor dem Oedterbach befindet, der Gesamtausfluss der beiden Modelle verglichen. Die Ausflussmenge und die Differenz stammen aus der zehnjährigen Langzeitsimulation, die für beide Modelle angesetzt wurden.

Man sieht in der Grafik, dass das Modell mit den Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur, das in grün angezeigt ist, besser abschneidet, als das in orange gezeigte Modell des IST-Zustandes. Insgesamt fließen 3,60% weniger Wasser in den Oedterbach, was in etwa 45000 Kubikmeter [m^3] ausmachen.

Wie in 3.6 bereits beschrieben, sind die angegebenen Werte auf der Y-Achse der Abbildung 4-7 repräsentativ, da die Werte auf Berechnungen vom festgelegten Berechnungszeitschritt von 10 Sekunden basieren. Laut dem Statusbericht von PC-SWMM besteht der Abfluss von ungefähr 1.213.000 Kubikmetern zu etwa 80-83% aus Trockenwetterabfluss, während die restlichen 17-20% Niederschlags- und Oberflächenabfluss darstellen.

4.3.2 Auswertung aller Schwerpunktbereiche des gesamten Einzugsgebietes

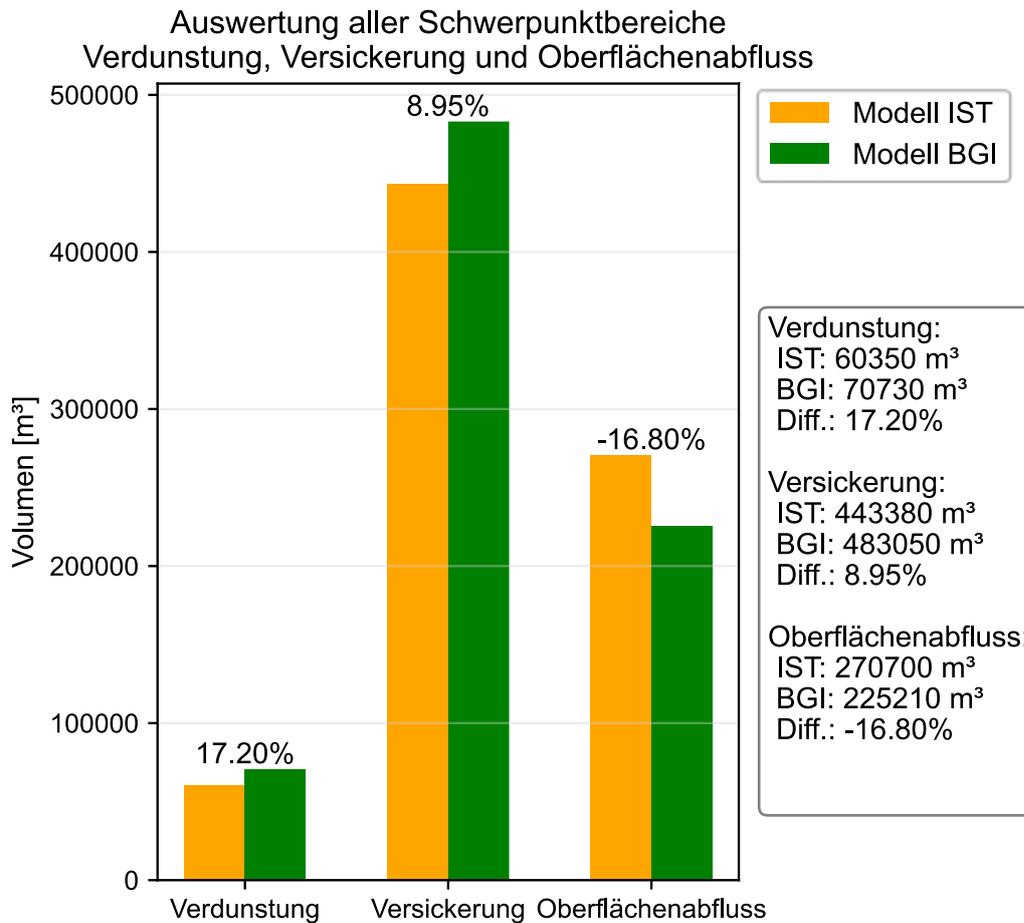


Abbildung 4-8: Darstellung des Gesamtberichtes der Schwerpunktbereiche Verdunstung, Versickerung und Oberflächenabfluss.

Die Auswertung in Abbildung 4-8 verdeutlicht, dass die Implementierung der Maßnahmen der BGI zu guten Ergebnissen führt.

Insbesondere zeigt sich, dass sowohl die Verdunstung als auch die Versickerung im Vergleich zum IST-Zustand um 17,20% bzw. 8,95% zunehmen. Dies deutet darauf hin, dass die BGI-Maßnahmen effektiv dabei helfen, das Niederschlagswasser zurückzuhalten und dies dazu führt, dass das Wasser anschließend verdunstet und versickert. Besonders bemerkenswert ist die Verringerung des Oberflächenabflusses um insgesamt 16,80%. Diese Reduktion der Schwerpunktbereiche des Abflusses weisen darauf hin, dass die Maßnahmen der BGI erfolgreich dabei unterstützen, die Belastung des Entwässerungssystems zu reduzieren. Diese Ergebnisse deuten auf die Effektivität der angewandten Maßnahmen hin und zeigen die Bedeutung der blau-grünen Infrastruktur als nachhaltige Strategie zur Bewältigung von Herausforderungen im Wasserressourcenmanagement.

Die Werte dieser Auswertung stammen aus dem Statusbericht und basieren auf Berechnungen vom festgelegten Berechnungszeitschritt von 10 Sekunden. Wie

bereits im Unterkapitel 4.3.1 erwähnt, machen etwa 17-20% des Gesamtabflusses von 1.213.000 Kubikmetern Wasser Niederschlags- und Oberflächenabfluss aus. Dies entspricht einem Volumen von 225.210 Kubikmetern Oberflächenwasser, wie in Abbildung 4-8 dargestellt.

4.3.3 Auswertung der Abflüsse in Kanälen des gesamten Einzugsgebietes

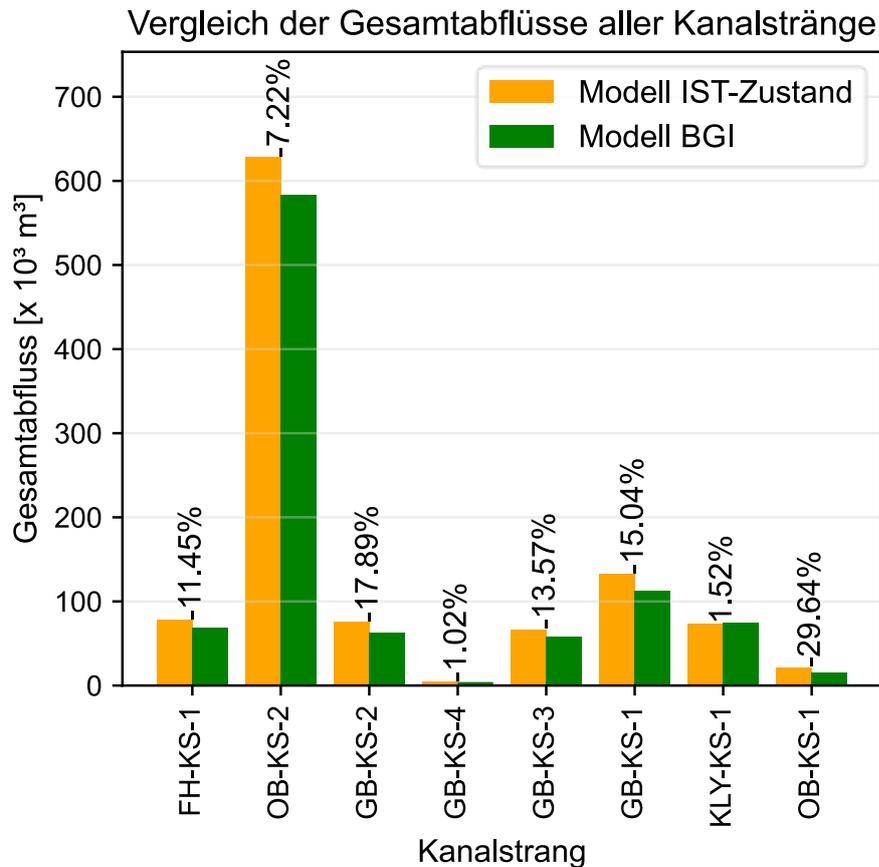


Abbildung 4-9: Auswertung und Vergleich der Kanäle zwischen dem Modell des IST-Zustandes und Modell mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur

Die Abbildung 4-9 zeigt den Vergleich der Gesamtabflüsse der einzelnen Kanalstränge. Auf der Y-Achse ist das Volumen in Kubikmeter zu entnehmen. Auf der X-Achse werden die einzelnen Kanalstränge aufgelistet. Bei jedem Kanalstrang ist die Reduzierung bzw. Vergrößerung des Gesamtabflusses in Prozent angegeben.

Die Auswertung lässt feststellen, dass FH-KS-1 eine Reduzierung des Volumens um 11,45% aufweist. Die Kanäle GB-KS-2 (17,89%), GB-KS-3 (13,57%) und GB-KS-1 (15,04%) haben ebenso eine Reduzierung des Gesamtabflusses im Kanal. Lediglich der Kanalstrang beim Kelly (KLY-KS-1) hat eine Vergrößerung des Gesamtabflusses um 1,52%. Der Grund dafür wird in dem Unterkapitel 4.6.1 erläutert. Die größte relative Verbesserung kann im Kanal OB-KS-1 mit 29,64% erkannt werden, da dort die Flächen der Straße entlang der Oswaldigasse mit dem Regengarten verbunden sind und somit deutlich entlastet wird. Die geringste Wassermenge fließt durch den Kanal GB-KS-4 und weist eine Verbesserung von nur 1,02% auf. Der Kanal OB-KS-2 ist der letzte Teil des Kanalsystems, bevor das Wasser in den Oedterbach fließt. Hier sammeln sich alle Abflüsse, weshalb die größte Menge an Wasser durch diesen Kanal fließt und dann in den Bach

gelangt. Durch die Einführung von BGI-Maßnahmen kann eine Verbesserung von etwa 7,22% erzielt werden, was einer Reduzierung des Wasservolumens um 45000 Kubikmeter entspricht. Dies würde das Abflussvolumen, das innerhalb von zehn Jahren durch diesen Kanalabschnitt fließt, verringern und somit den Oedterbach entlasten.

Allgemein erkennt man in allen Kanalabschnitten, außer dem GB-KS-4 (+1,52%), eine Verringerung der gesamten Abflussmenge durch die Implementierung der Maßnahmen der BGI.

In 3.6 bereits beschrieben, sind die angegebenen Werte auf der Y-Achse der Abbildung 4-9 jedoch weniger repräsentativ, da die Werte auf Berechnungen vom festgelegten Aufzeichnungszeitschritt von 120 Sekunden basieren.

4.3.4 Auswertung der Abflussspitzen am Auslass des gesamten Einzugsgebietes

In diesem Unterkapitel werden die Abflussspitzen des Kanalabschnittes OB-KS-2 verglichen. Dieser befindet sich kurz vor dem Oedterbach und wird deswegen ausgewertet, da er das gesamte Einzugsgebiet zusammenfasst und die Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur insgesamt analysiert.

4.3.4.1 Vergleich Abflussspitze

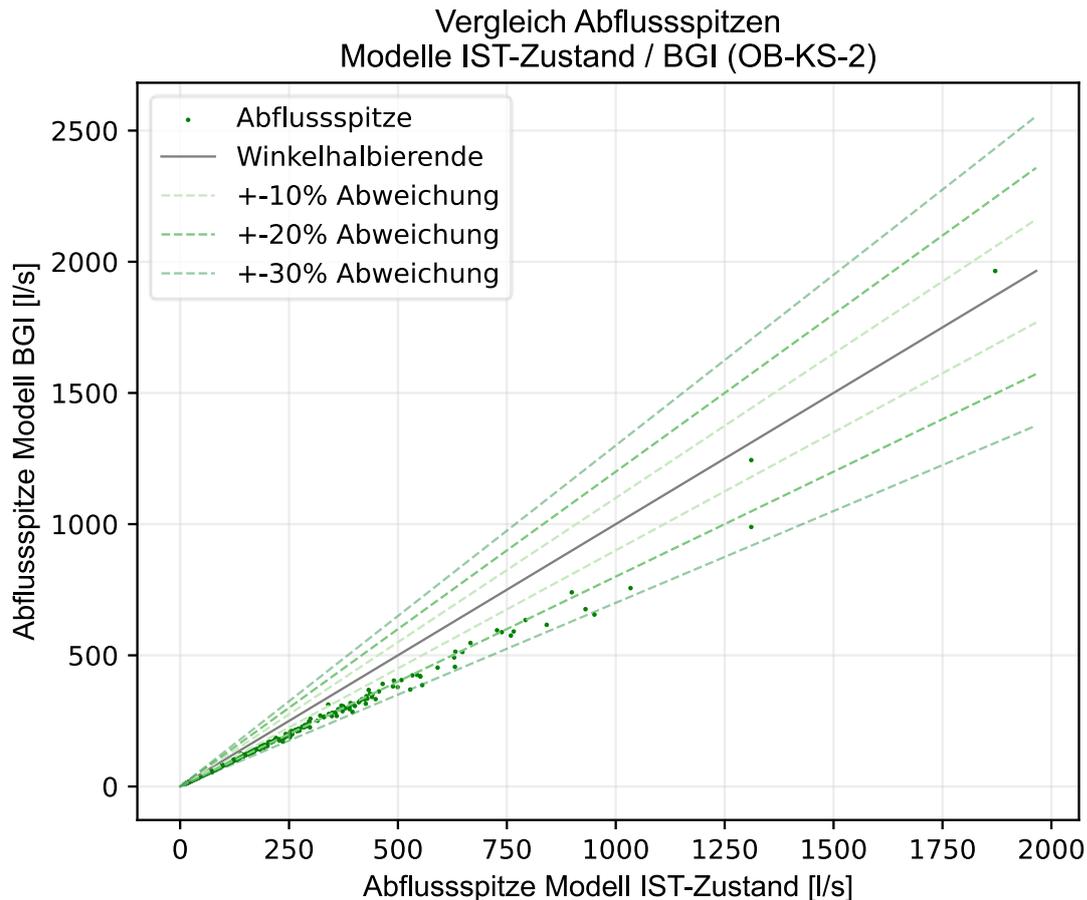


Abbildung 4-10: Vergleich der Abflussspitzen zwischen dem Modell des IST-Zustandes und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur in Liter pro Sekunde [l/s]

Diese Abbildung 4-10 zeigt einen Vergleich der Abflussspitzen zwischen dem Modell des IST-Zustandes und dem Modell mit BGI-Maßnahmen im Kanalabschnitt OB-KS-2. Die Daten stammen aus der zehnjährigen Langzeitsimulation, in der 442 Ereignisse zusammengefasst und in der Grafik als grüne Punkte dargestellt werden. Auf der Y-Achse ist das Modell mit den Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur abgebildet, auf der X-Achse das Modell des IST-Zustandes.

Die grau-durchgezogene Linie repräsentiert die Winkelhalbierende, die die beiden Modelle vergleicht. Auffällig ist, dass bis auf ein Ereignis alle Punkte unterhalb

dieser Linie liegen. Insbesondere fallen die meisten Ereignisse in den Bereich zwischen den Abweichungslinien von 10% und 30%. Dies verdeutlicht, dass die Abflussspitzen des Modells mit den blau-grünen Infrastrukturmaßnahmen im Vergleich zum IST-Zustand um 10-30% niedriger ausfallen. Somit zeigt sich, dass in 441 von 442 Ereignissen im Kanalabschnitt das Modell mit den BGI-Maßnahmen niedrigere Abflussspitzen aufweist. Einzig bei einem extremen Ereignis am 22.08.2020 (vgl. 3.9), verzeichnet das BGI-Modell eine größere Abflussspitze im Vergleich zum IST-Zustand.

Wie in Unterkapitel 3.6 zu sehen, ist der Aufzeichnungszeitschritt für die Simulation mit zwei Minuten eingestellt. Ein zu großer Aufzeichnungszeitschritt in der Simulation hat verschiedene Auswirkungen auf das hydrologische Verhalten. Beispielsweise können wichtige Details verloren gehen, da weniger Datenpunkte verfügbar sind, um das Geschehen genau zu erfassen, besonders bei schnellen oder kurzfristigen hydrologischen Ereignissen wie beispielsweise bei diesem Niederschlagsereignis vom 22.08.2020. Zudem kann dies zu einer Vereinfachung des simulierten Abflussmusters führen, da es schwieriger wird, Spitzen im Abfluss genau zu erfassen, insbesondere bei Starkregenereignissen oder schnellen Veränderungen im Abflussverhalten. Vermutlich führt diese unzureichende zeitliche Auflösung in der zehnjährigen Langzeitsimulation bei diesem konkreten Extremereignis zu einem verfälschten Ergebnis und zu einer höheren Abflussspitze.

Basierend auf den festgestellten Differenzen zwischen den Ergebnissen des IST-Zustandsmodells und des Modells mit BGI-Maßnahmen während des Extremereignisses am 22.08.2020 wird eine neue Simulation zwischen 18:00 und 21:00 Uhr durchgeführt. Dabei wird nur der Zeitraum des Extremereignisses betrachtet, und sowohl der Berechnungszeitschritt als auch der Aufzeichnungszeitschritt werden auf 10 Sekunden festgelegt, um ein präziseres Ergebnis im Vergleich zu den vorherigen 120 Sekunden (vgl. Tabelle 3-6) zu erzielen. Die Ergebnisse dieser Simulation zeigen, dass die Abflussspitze des IST-Modells 1901 Liter pro Sekunde beträgt, während die des BGI-Modells 1691 Liter pro Sekunde beträgt. Somit bestätigt sich die Vermutung, dass die unzureichende zeitliche Auflösung in der zehnjährigen Langzeitsimulation zu einem verfälschten Ergebnis und einer höheren Abflussspitze während dieses konkreten Extremereignisses führt.

4.4 Auswertung der wasserwirtschaftlichen Schwerpunkte aller BGI-Maßnahmen

Die folgenden Grafiken zeigen Leistungsauswertungen aller Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur in den Schwerpunkten Verdunstung, Versickerung und Abfluss. Jede Maßnahmengruppe hat dabei eine Farbe zugeordnet bekommen und ist in den jeweiligen Legenden zu entnehmen. Die Daten stammen aus der zehnjährigen Langzeitsimulation. Auf der X-Achse sind die einzelnen Bezeichnungen der jeweiligen Maßnahmen angegeben. Die Standorte der einzelnen BGI-Maßnahmen im EZG können der Abbildung 3-7 entnommen werden.

Wichtig zu erwähnen ist, dass sich die Leistungsauswertungen der einzelnen BGI-Maßnahmen auf die angeschlossene Nettofläche beziehen. Somit ist eine Vergleichbarkeit der einzelnen BGI-Maßnahmen gegeben. Dadurch wird erreicht, dass man Rückschlüsse darüber geben kann, wie effektiv einzelne BGI-Maßnahmen bei der Verdunstung, Versickerung und Ableitung von überschüssigem Oberflächenwasser sind.

$$\text{Leistung [l/m}^2\text{]} = \frac{\text{Wasser [mm]} \times \text{Fläche BGI-Maßnahme [m}^2\text{]}}{\text{angeschl. Nettofläche [m}^2\text{]}} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

mit:

Leistung ... Verdunstungs-, Versickerungs-, Zufluss-, Abflussleistung der BGI-Maßnahme in Liter pro Quadratmeter [l/m²], Wasser ... Verdunstungs-, Versickerungs-, Zufluss-, Abflusswasser in Millimeter [mm], Fläche BGI Maßnahme ... Fläche der jeweiligen BGI-Maßnahme in Quadratmeter [m²], angeschl. Nettofläche... angeschlossene Nettofläche in Quadratmeter [m²]

$$\text{angeschl. Nettofläche [m}^2\text{]} = \sum \text{Bruttofläche [m}^2\text{]} \times \text{Abflussbeiwert [-]} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

mit:

angeschl. Nettofläche... angeschlossene Nettofläche in Quadratmeter [m²], Bruttofläche ... Fläche der einzelnen an die BGI-Maßnahme angeschlossenen Flächen in Quadratmeter [m²], Abflussbeiwert ... dimensionsloser Abflussbeiwert [-]

$$\text{Abflussbeiwert [-]} = \frac{\text{Gebietsabflussmenge [m}^3\text{]}}{\text{Gebietsniederschlag [m}^3\text{]}} \quad \text{Gleichung 4-3}$$

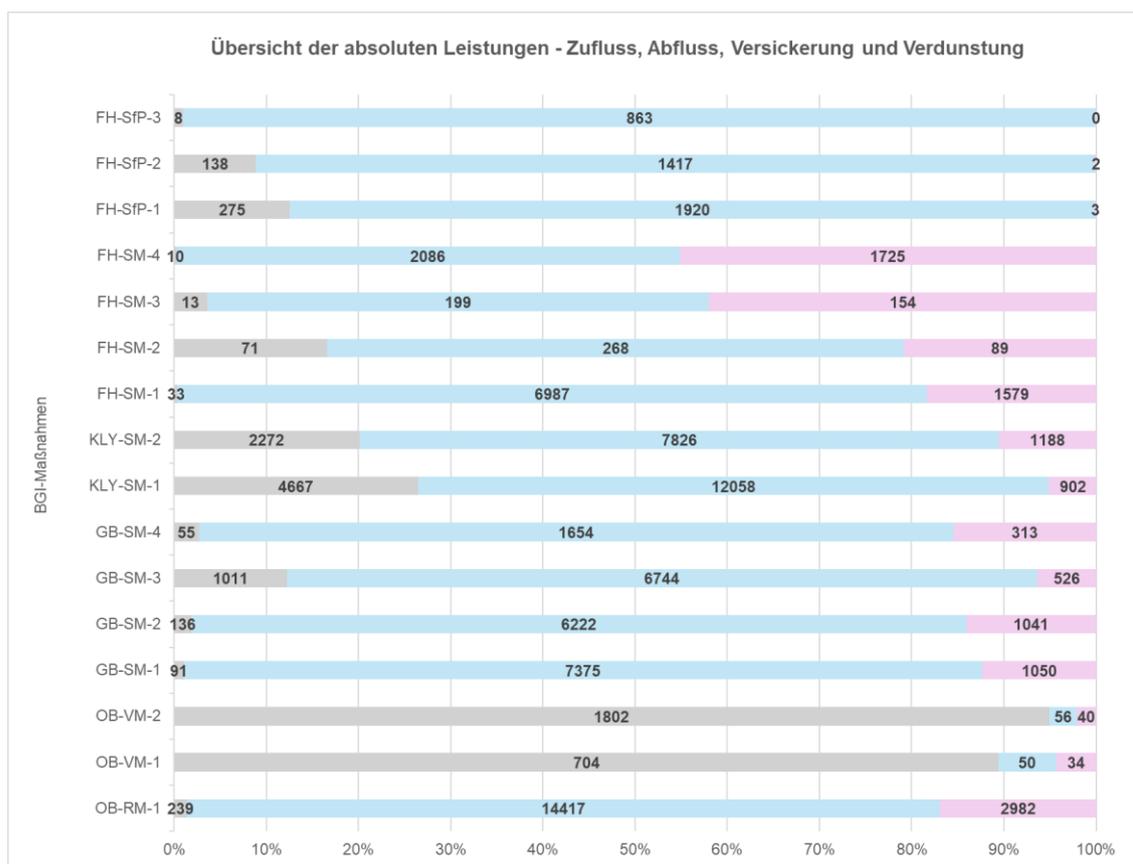
mit:

Abflussbeiwert ... dimensionsloser Abflussbeiwert [-], Gebietsabflussmenge ... Abflussmenge der einzelnen an die BGI-Maßnahme angeschlossenen Flächen in Kubikmeter [m³], Gebietsniederschlag ... Niederschlag der einzelnen an die BGI-Maßnahme angeschlossenen Flächen in Kubikmeter [m³]

Der Abflussbeiwert, mit der die Nettofläche berechnet wird, ist eine dimensionslose Größe, die angibt, wie viel Niederschlagsoberflächenabfluss erzeugt wird, basierend auf den Eigenschaften der Oberfläche, wie zum Beispiel der Bodenart, der Vegetationsbedeckung, der Neigung und der Entwässerungsinfrastruktur.

Die Auswertung der BGI-Maßnahmen berücksichtigt zwar die Menge pro Fläche, jedoch ist es schwierig, die tatsächlichen Auswirkungen jeder einzelnen BGI-Maßnahme genau nachzuvollziehen. Beispielsweise hat eine BGI-Maßnahme eine Verdunstungsleistung von 1000 l/m² auf einer Fläche von 1000 m², während eine andere Maßnahme eine Verdunstungsleistung von 2500 l/m² auf nur 100 m² hat. Obwohl die erste Maßnahme im Vergleich zur zweiten eine kleinere Verdunstungsleistung hat, erzielt sie tatsächlich eine viel bessere absolute Verdunstung. Um eine genauere Vorstellung von den absoluten Leistungen zu erhalten, werden in Abbildung 4-11 die absoluten Werte der Größe, Versickerung, Verdunstung und Abfluss der jeweiligen BGI-Maßnahmen dargestellt.

Die Balkendiagramme in Abbildung 4-11 veranschaulichen die absoluten Werte der einzelnen BGI-Maßnahmen. Nachdem das Niederschlags- und Oberflächenwasser als Zufluss in die BGI-Maßnahmen gelangt, kann das Wasser entweder verdunsten (rosa dargestellt), versickern (hellblau dargestellt) oder bei Erreichen der Kapazitätsgrenze als Abfluss (grau dargestellt) austreten. Die absoluten Werte der Versickerung, Verdunstung, Zufluss, Abfluss und Größe sind in der Tabelle im unteren Teil der Abbildung aufgeführt. Die absoluten Werte sind ebenso in den einzelnen Balken in Kubikmeter angegeben.



	OB-RM-1	OB-VM-1	OB-VM-2	GB-SM-1	GB-SM-2	GB-SM-3	GB-SM-4	KLY-SM-1	KLY-SM-2	FH-SM-1	FH-SM-2	FH-SM-3	FH-SM-4	FH-SfP-1	FH-SfP-2	FH-SfP-3
BGI-Maßnahmengröße m ²	450,00	25,00	25,00	122,00	122,00	60,00	38,00	103,00	145,00	196,00	12,50	23,00	247,00	50,00	50,00	100,00
Zufluss [m ³]	17643	785	1892	8512	7396	8279	2020	17624	11284	8594	428	366	3820	2190	1550	870
Abfluss [m ³]	239	704	1802	91	136	1011	55	4667	2272	33	71	13	10	275	138	8
Versickerung [m ³]	14417	50	56	7375	6222	6744	1654	12058	7826	6987	268	199	2086	1920	1417	863
Verdunstung [m ³]	2982	34	40	1050	1041	526	313	902	1188	1579	89	154	1725	3	2	0

Abbildung 4-11: Darstellung aller BGI-Maßnahmen und dessen Größe, Zuflüsse, Abflüsse, Verdunstung und Versickerung in Kubikmeter [m³ Wasser]

Grau dargestellte Balken deuten den Abfluss an. Diese sollten bei allen BGI-Maßnahmen Null oder nahe Null sein, da dies hindeutet, dass diese BGI-Maßnahmen an die Kapazitätsgrenzen stoßen und das Wasser in weiterem Anschluss abfließt. Lediglich bei den beiden vegetativen Mulden OB-VM-1 und OB-VM-2 ist ein Oberflächenabfluss geplant, da dort das überschüssige Wasser in den Regengarten abfließen.

Ergebnisse und Diskussion

Um den Zufluss besser darzustellen, wird das Verhältnis zwischen der angeschlossenen Nettofläche zur BGI-Maßnahmengröße in der Tabelle 4-2 angegeben. Die angeschlossene Nettofläche wird mit der Fläche der BGI-Maßnahme dividiert. Höhere Zahlen könnten darauf hindeuten, dass je BGI-Maßnahme zu viel Fläche angeschlossen ist und dies zu höheren Abflüssen führen könnte. Man erkennt, dass die GB-SM-3 mit 14,9 und KLY-SM-1 mit 15,5 sehr große Werte im Vergleich zu den anderen BGI-Maßnahmen aufweisen. Es lässt vermuten, dass zu viele Flächen an die beiden BGI-Maßnahmen angeschlossen sind. FH-SfP-3 hat einen Wert von Null, da an diese BGI-Maßnahme keine Fläche angeschlossen ist und somit nur Niederschlagswasser verarbeitet, das auf die BGI-Maßnahme fällt.

Tabelle 4-2: Verhältnis angeschlossene Nettofläche zur Größe der BGI-Maßnahme

BGI-Maßnahme	BGI-Maßnahmengröße [m ²]	Angeschlossene Nettofläche [m ²]	Verhältnis angeschlossene Nettofläche zu BGI-Maßnahme [m ² / m ²]
OB-RM-1	450	995,1	2,2
OB-VM-1	25	64,7	2,6
OB-VM-2	25	192,1	7,7
GB-SM-1	122	855,7	7,0
GB-SM-2	122	770,7	6,3
GB-SM-3	60	891,3	14,9
GB-SM-4	38	192,3	5,1
KLY-SM-1	103	1601,1	15,5
KLY-SM-2	145	792,9	5,5
FH-SM-1	196	790,6	4,0
FH-SM-2	12,5	6,4	0,5
FH-SM-3	23	4,98	0,2
FH-SM-4	247	169,6	0,7
FH-SfP-1	50	201,3	4,0
FH-SfP-2	50	127,5	2,6
FH-SfP-3	100	0,0	0,0

4.4.1 Leistungsauswertung der Abflüsse aller BGI-Maßnahmen

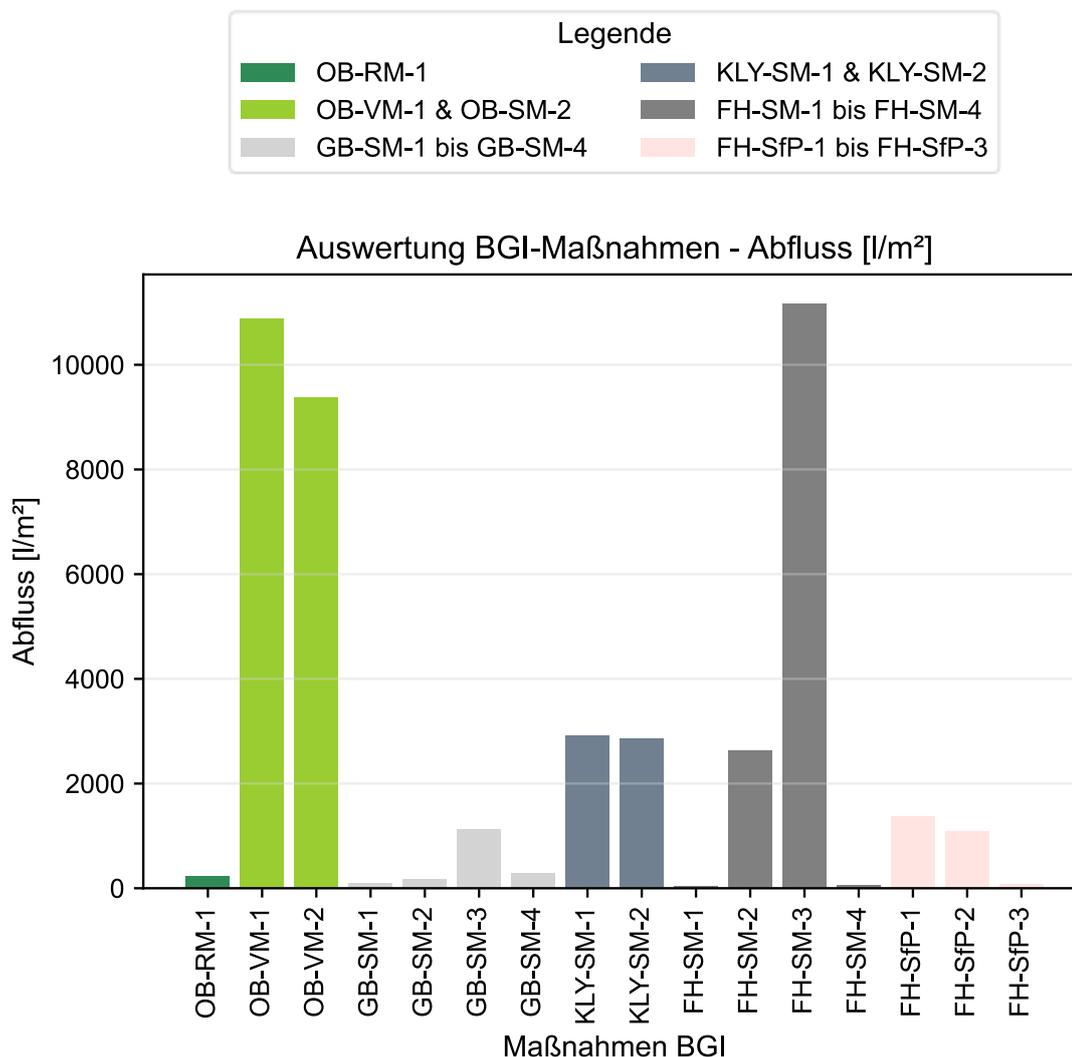


Abbildung 4-12: Übersicht über die Leistung der einzelnen BGI-Maßnahmen in Bezug auf Abflüsse [l/m^2]

In dieser Abbildung 4-12 werden die Abflussleistungen der einzelnen BGI-Maßnahmen gezeigt. Das Ziel wäre es, wie in 4.4 erwähnt, die Abflussleistung auf ein Minimum zu reduzieren oder idealerweise ganz zu vermeiden. Diese Auswertung lässt vermuten, dass die Kapazitäten bei einzelnen BGI-Maßnahmen erreicht werden und schließen, dass vereinzelt zu viele Flächen an die BGI-Maßnahmen angeschlossen sind und diese das Wasser nicht rechtzeitig verarbeiten können. Dies ist auch in der Abbildung 4-11 anhand der grau hinterlegten Balken ersichtlich, die den Abfluss darstellen. Um genauere Aussagen über die Kapazitätsgrenzen geben zu können, werden im Unterkapitel 4.5 bis einschließlich Unterkapitel 4.8 Wasserstandauswertungen der einzelnen BGI-Maßnahmen genauer betrachtet.

Die Abbildung 4-12 lässt vermuten, dass die Sickermulde FH-SM-2 aufgrund ihrer geringen angeschlossenen Nettofläche ($6,4\text{m}^2$) sehr hohe Abflussleistungen aufweist (vgl. Tabelle 4-2). Die Abbildung 4-11 zeigt, dass FH-SM-2 etwa 17% des Zuflusses wieder abfließen lässt. Über die zehnjährige Simulation entspricht dies etwa 71m^3 an Abflussvolumen. Relativ gesehen ist dies ein beträchtlicher Anteil. Aufgrund der kleinen Fläche von FH-SM-2 (nur $12,5\text{m}^2$) ist der absolute Abfluss jedoch nicht so groß.

Die Sickermulde FH-SM-3 zeigt in Abbildung 4-12 eine Abflussleistung von fast 11000 Litern pro Quadratmeter, obwohl Abbildung 4-11 zeigt, dass nur etwa 3% des Gesamtzuflusses aus der BGI-Maßnahme abfließen. Dies entspricht ungefähr 13m^3 Abfluss, was absolut gesehen nicht viel ist. Die hohe Abflussleistung von 11000 l/m^2 ist somit auch auf die geringe angeschlossene Nettofläche zurückzuführen.

Die Sickermulden beim Kelly KLY-SM-1 und KLY-SM-2 weisen mit etwa 3000l/m^2 auch eine recht hohe Abflussleistung auf. Dies bestätigt sich wiederum mit der Tabelle 4-2, dass vor allem an KLY-SM-1 zu viel Fläche angeschlossen wird und dadurch viel Wasser wieder bei Erreichen der Kapazitätsgrenze austritt.

Die sickerfähigen Parkplätze FH-SfP-2 und FH-SfP-1 zeigen ebenfalls Oberflächenabfluss von bis zu etwa 1500 Litern pro Quadratmeter. Es gibt Potenzial für Optimierungen, wie die Verwendung durchlässigerer Beläge, um das Oberflächenwasser schneller und effizienter in den darunterliegenden Speicher gelangen zu lassen und mehr Flächen anzuschließen. Eine weitere Möglichkeit wäre, eine Bermenhöhe von 1-2 cm einzuführen, damit das Wasser teilweise in der Sickermulde verbleibt und nicht sofort abfließt, wie es in diesem BGI-Modell derzeit der Fall ist.

4.4.2 Leistungsauswertung der Verdunstung aller BGI-Maßnahmen

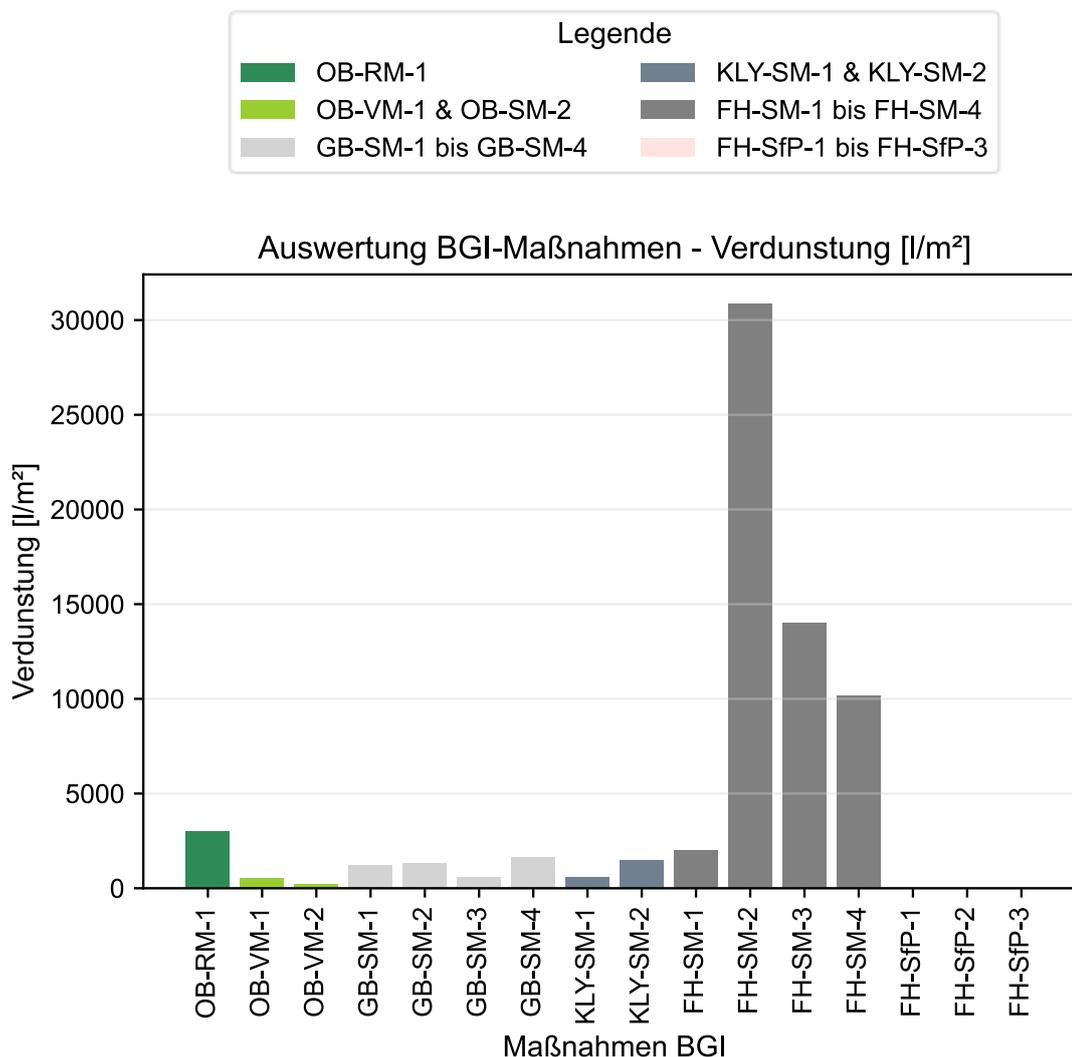


Abbildung 4-13: Übersicht über die Leistung der einzelnen BGI-Maßnahmen in Bezug auf Verdunstung [l/m^2]

In der Abbildung 4-13 kann die Verdunstungsleistung für die einzelnen Maßnahmen der BGI abgelesen werden. Man erkennt, dass die Sickermulden FH-SM-2 bis FH-SM-4 beim Friedhof allesamt sehr hohe Verdunstungsleistungen aufweisen. Die Sickermulden FH-SM-3 und FH-SM-4 haben Verdunstungsleistungen von $10000 l/m^2$ bzw. $14000 l/m^2$. Die Sickermulde FH-SM-2 hat eine beachtliche Verdunstungsleistung von über $30000 l/m^2$. Die Sickerfähigen Parkplätze FH-SfP-1 bis FH-SfP-3 geben erwartungsgemäß aufgrund des Aufbaus und der Wahl der Materialien und Beläge kein Wasser an die Luft ab, sondern speichern es im Speicher ab bzw. fließt als Oberflächenwasser weiter in die Sickermulden FH-SM-2 und FH-SM-3 ab.

4.4.3 Leistungsauswertung der Versickerung aller BGI-Maßnahmen

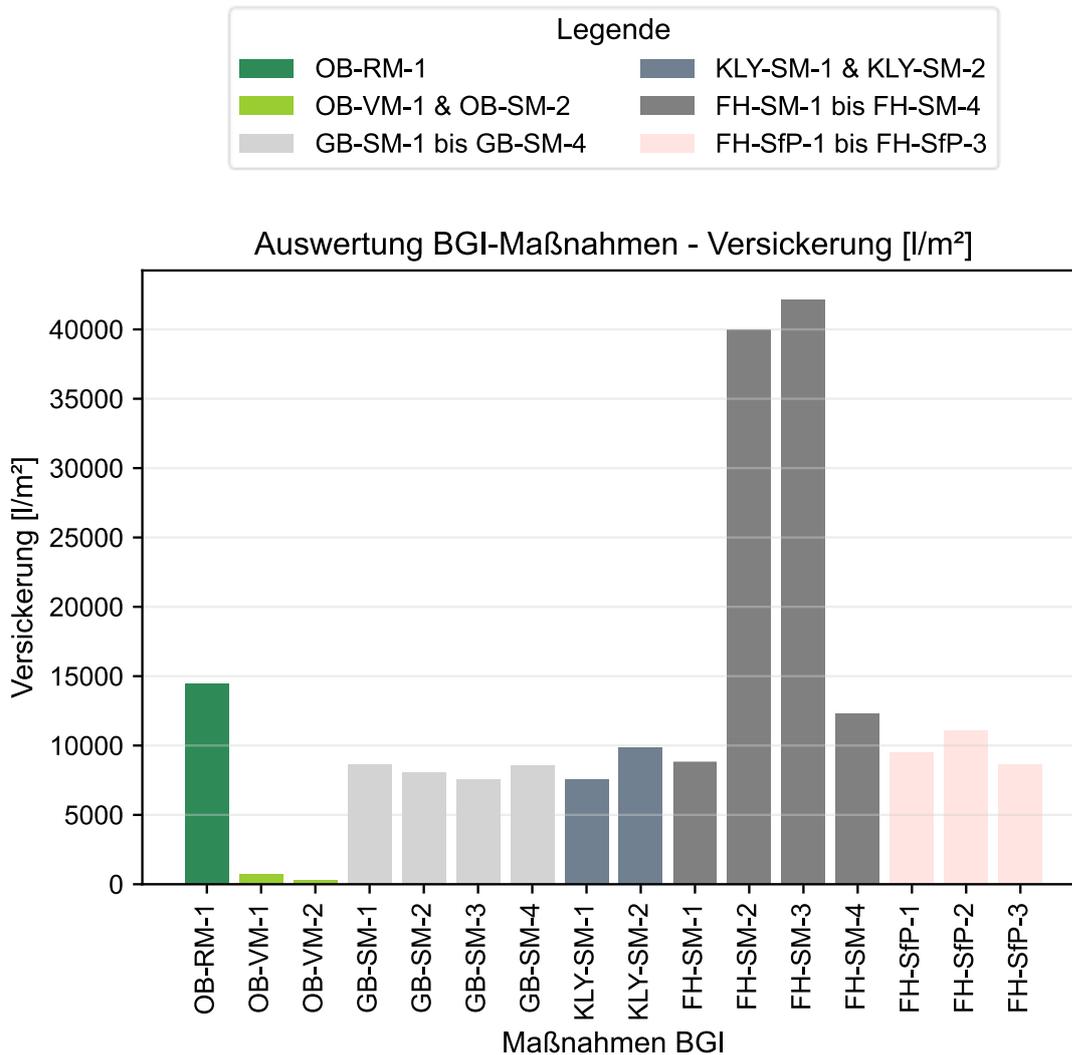


Abbildung 4-14: Übersicht über die Leistung der einzelnen BGI-Maßnahmen in Bezug auf Versickerung [l/m²]

In der Abbildung 4-14 kann die Versickerungsleistung der einzelnen Maßnahmen betrachtet werden und auf der Y-Achse in Liter pro Quadratmeter abgelesen werden. Aufgrund des Aufbaus versickert bei der vegetativen Mulde (OB-VM-1 und OB-VM-2) erneut nahezu kein Wasser, sondern leitet es in die Regenmulde (OB-RM-1) weiter. Alle BGI-Maßnahmen, bis auf die beiden vegetativen Mulden OB-VM-1 und OB-VM-2, haben gute Versickerungsleistungen von in etwa 8000 bis 14000 [l/m²] Liter pro erschlossene Nettofläche. Dies bringt jedoch keinen Aufschluss darüber, wie viel Wasser konkret in den Untergrund versickern kann. Die Sickermulden FH-SM-2 und FH-SM-3 zeigen mit 40000 l/m² und 42000 l/m² die besten Versickerungsleistungen, deutet aber darauf hin, dass diese beiden Sickermulden wenig angeschlossene Flächen haben (vgl. Tabelle 4-2).

4.5 Auswertungen der Teilfläche „Friedhof“

Nach der Auswertung des gesamten Einzugsgebietes und aller BGI-Maßnahmen folgt nun die Auswertung der einzelnen Maßnahmenpakete (vgl. 3.8.1).

4.5.1 Kanalabschnitt FH-KS-1

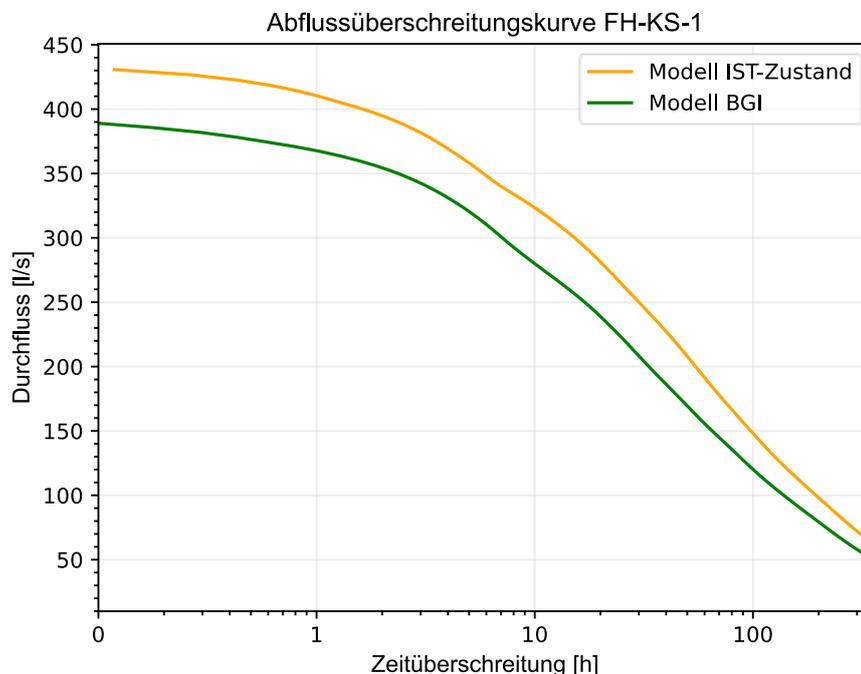


Abbildung 4-15: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt FH-KS-1

Ein Vergleich der beiden Linien zeigt in dieser Abbildung 4-15, dass im gesamten Zeitverlauf des Kanalstranges FH-KS-1, der ein Kanalstrang des Maßnahmenpaketes „Friedhof“ ist, die grüne Linie (BGI-Maßnahmen-Modell) stets unterhalb der orangefarbenen Linie (IST-Modell) liegt. Sowohl bei großen Ereignissen, bei denen die Abflussmengen über 300 l/s für diesen Kanal liegen, als auch bei kleineren Ereignissen mit Abflussmengen von nur 50 l/s zeigen sich deutliche Verbesserungen. Dies deutet darauf hin, dass die Maßnahmen wirksam sind und dazu beitragen, den Abfluss unabhängig von der Größe des Ereignisses zu reduzieren.

Dieser Kanalstrang gilt als besonders wichtig, weil die BGI-Maßnahmen FH-SM-1, FH-SM-2, FH-SM-3, FH-SM-4, FH-SfP-1, FH-SfP-2 und FH-SfP-3 gemeinsam dazu beitragen, den Kanalstrang FH-KS-1 zu entlasten. Man kann somit rück schließen, dass alle BGI-Maßnahmen des Maßnahmenpaketes „Friedhof“ insgesamt gute Ergebnisse liefern und den Abfluss senken. Um bessere Einblicke über die einzelnen BGI-Maßnahmen des Maßnahmenpaketes „Friedhof“ bezüglich deren Wirksamkeit zu erhalten, werden sie nachfolgend genauer betrachtet.

4.5.1.1 Auswertung Wasserstandniveau FH-SfP-3

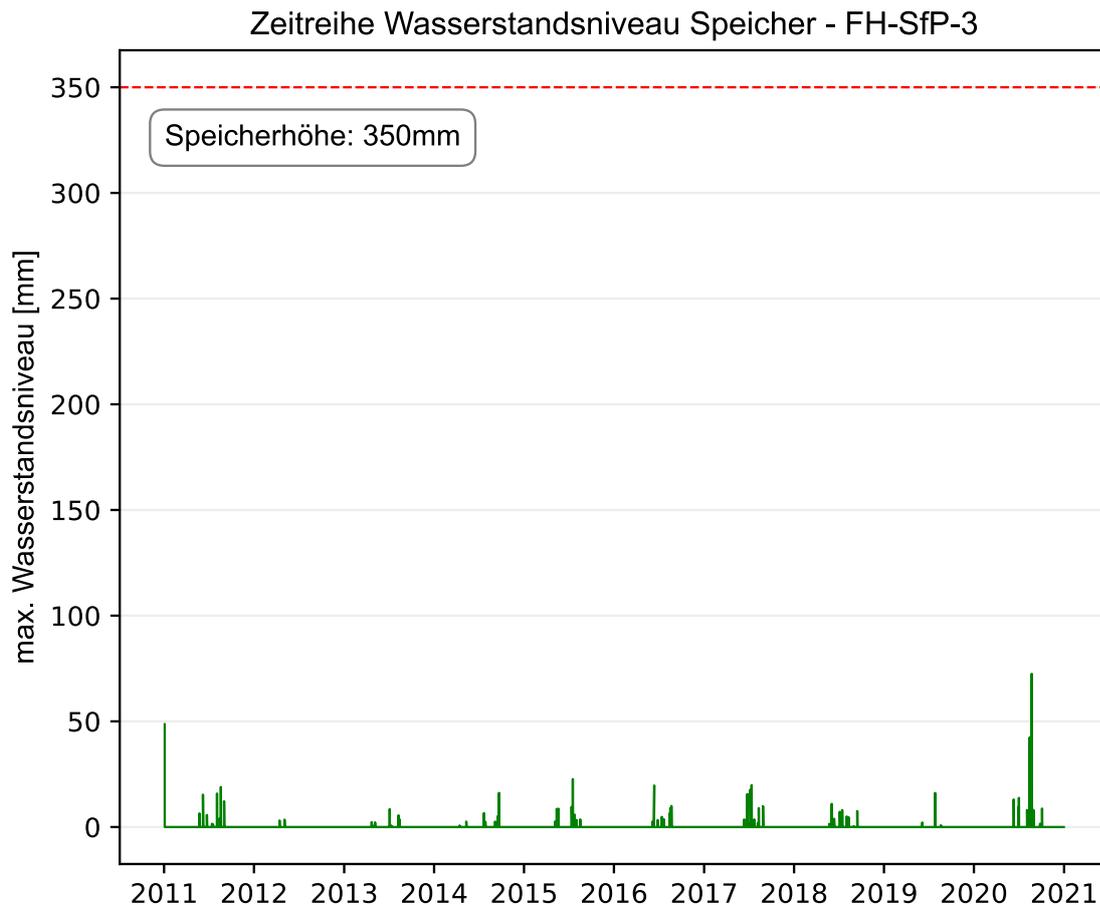


Abbildung 4-16: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SfP-3 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Sickerfähiger Parkplatz mit 100m² (Friedhof)

Das FH-SfP-3, das auf der Abbildung 4-16 gezeigt wird, ist mit einer Wasserstandhöhe von maximal 75mm, das lediglich einmal so hoch ansteht und ansonsten zwischen 0 und 25mm ansteht, sehr gering ausgelastet. Es besteht hier Potenzial, mehr Flächen anzuschließen. Das Ereignis, bei dem das Wasser bis zu 75mm ansteht, ist das Extremereignis vom 22.08.2020 (vgl. 3.9). Die erhöhten Wasserstandhöhen an diesem Tag sind in den nachfolgenden Abbildungen ebenfalls zu sehen.

Wichtig zu erwähnen ist, dass das FH-SfP-3 als ein versickerungsfähiger Parkplatz ausgeführt ist und somit einen Speicher von 350mm Höhe aufweist und sich dort das Wasser anstaut. Im Speicher der BGI-Maßnahme ist ein Drainagerohr als Überlauf angeschlossen. Das Drainagerohr ist auf einer Höhe von 190mm von Unterkante des Speichers mit einem DN160 installiert. Da das Wasser aber diese Stauhöhe nie erreicht, wird auch kein Wasser aus dem Speicher durch das Rohr abfließen. Das deutet darauf hin, noch mehr Fläche an FH-SfP-3 anzuschließen, um den Speicher besser zu füllen und somit das Wasser von der Oberfläche in den Speicher zu bekommen. Möglich wäre es auch, eine Berme von 1-

2 cm zu bauen, damit das Wasser länger auf der Oberfläche verweilt und so in den Speicher gelangt. Auf einer Fläche von 100 m² beträgt bei FH-SfP-3 (vgl. Abbildung 4-11) der Zufluss 870 m³. Während keine Verdunstung auftritt, versickern 863 m³ und nur ein minimaler Abfluss von 8 m³ wird abgeleitet.

4.5.1.2 Auswertung Wasserstandniveau FH-SM-4

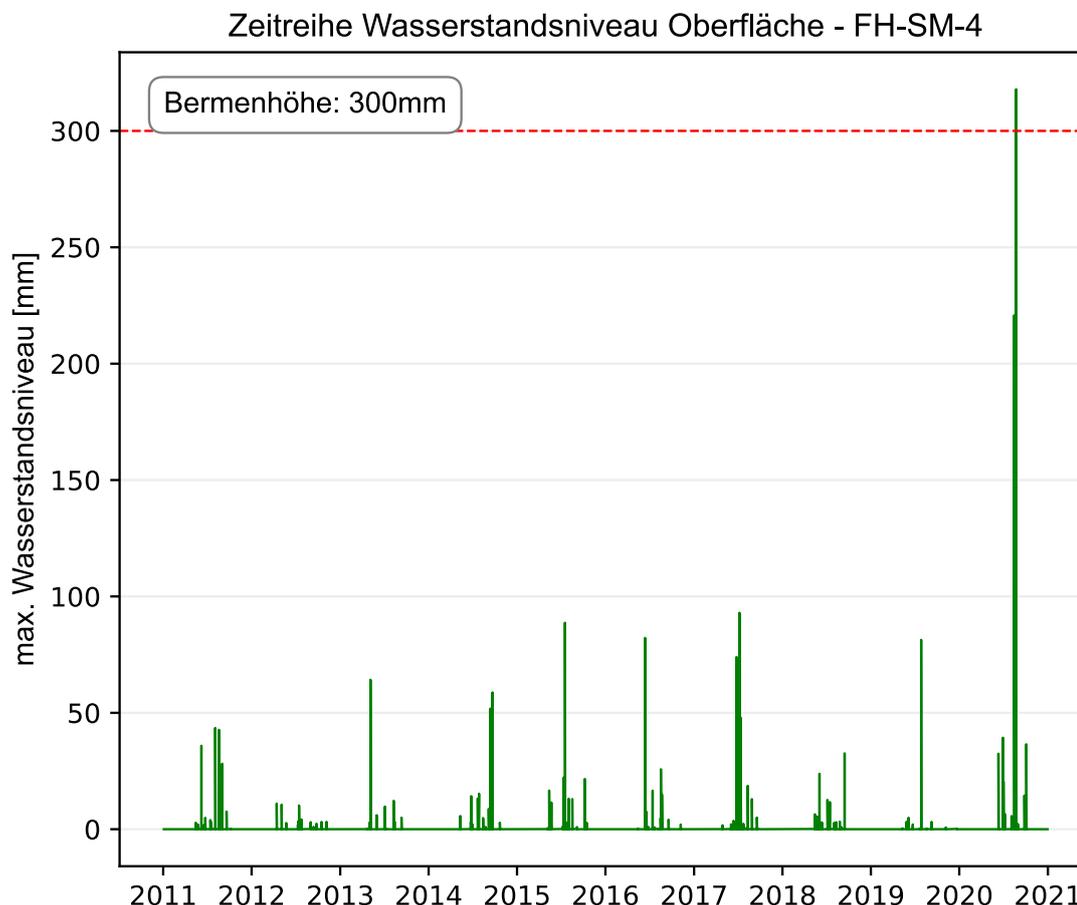


Abbildung 4-17: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SM-4 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 247m² (Friedhof)

Auf der Abbildung 4-17 ist zu erkennen, dass die Wasserstände im FH-SM-4 mit maximal 100mm sehr gering sind. Lediglich einmal übersteigt der Wasserstand 300mm im Sommer 2020 (vgl. 3.9). Dies legt nahe, dass das Potenzial besteht, mehr Flächen anzuschließen, um eine größere Wasserrückhaltung zu ermöglichen. Dadurch könnte sich die Verdunstungs- und Versickerungsleistung (vgl. Abbildung 4-13 & Abbildung 4-14) verbessern. Wie bereits in Abschnitt 4.5.1.1 erwähnt, fließt überschüssiges Oberflächenwasser, das nicht in den Speicher gelangt, in diese Sickermulde FH-SM-4. Durch eine verbesserte Erschließung der BGI-Maßnahme FH-SfP-3, somit auch mehr Abfluss des Oberflächenwassers, könnte wiederum mehr Wasser an diese BGI-Maßnahme FH-SM-4 weitergeleitet werden, was zu einer erhöhten Wasserrückhaltung führt.

Absolut gesehen umfasst FH-SM-4 eine Fläche von 247 m² und erhält einen Zufluss von 3820 m³, während 1725 m³ verdunsten und 2086 m³ versickern (vgl. Abbildung 4-11). Lediglich 10 m³ werden als Abfluss abgeleitet.

4.5.1.3 Auswertung Wasserstandniveau FH-SfP-2

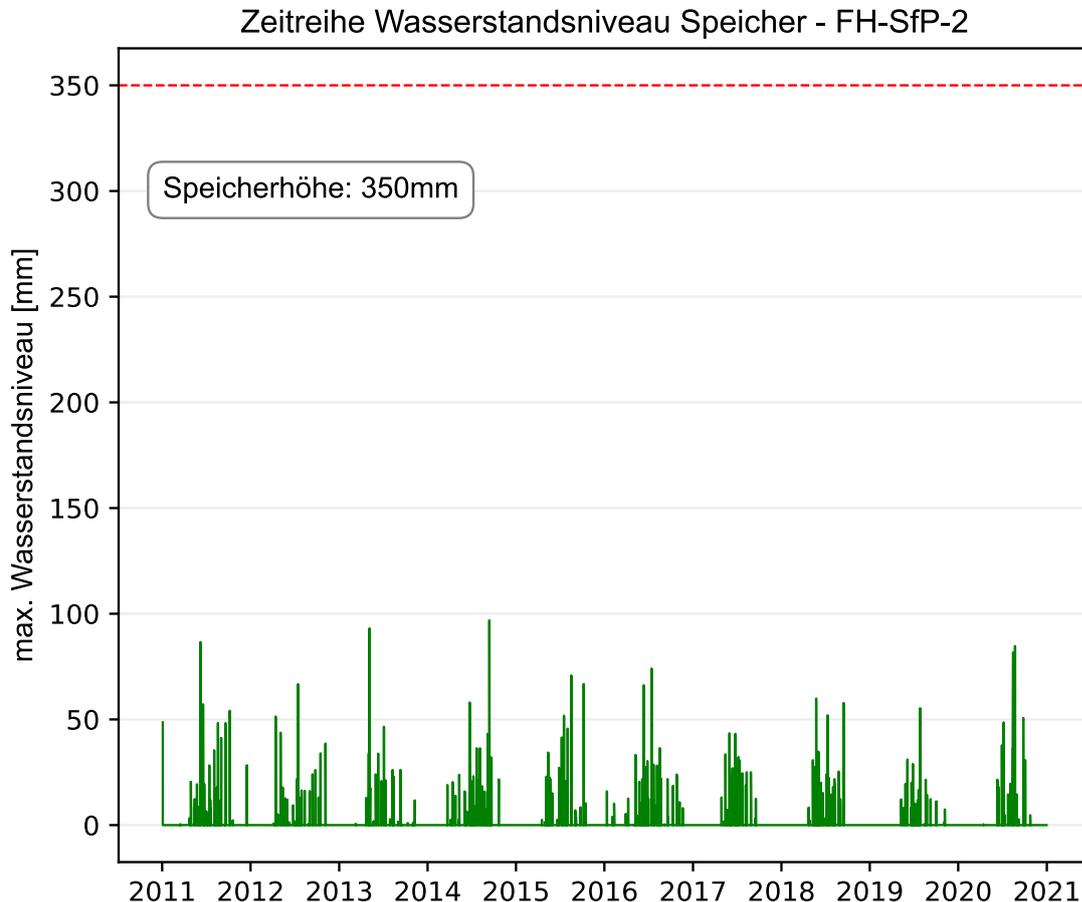


Abbildung 4-18: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SfP-2 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Sickerfähiger Parkplatz mit 50m² (Friedhof)

Das FH-SfP-2 hat eine Speicherhöhe von 350mm und ist als versickerungsfähiger Parkplatz ausgeführt. Die BGI-Maßnahme hat eine Speicherhöhe von maximal 95mm in der zehnjährigen Simulation erreicht. Somit ist die Kapazitätsgrenze nicht ausgeschöpft und hat noch Potenzial, dass mehr Flächen angeschlossen werden.

Wie im FH-SfP-3 (vgl. 4.5.1.1) sollte auch hier im FH-SfP-2 mehr Fläche angeschlossen werden, da diese BGI-Maßnahme das überschüssige Wasser an FH-SM-3 (vgl. 4.5.1.4) weiterleitet. Da die Kapazitätsgrenze hier ebenso nie erreicht wird, geht viel Potenzial verloren, mehr Regenwasser rückzuhalten.

Insgesamt hat FH-SfP-2 (vgl. Abbildung 4-11) absolut gesehen einen Zufluss von 1550 m³ und einen Abfluss von 138 m³.

4.5.1.4 Auswertung Wasserstandniveau FH-SM-3

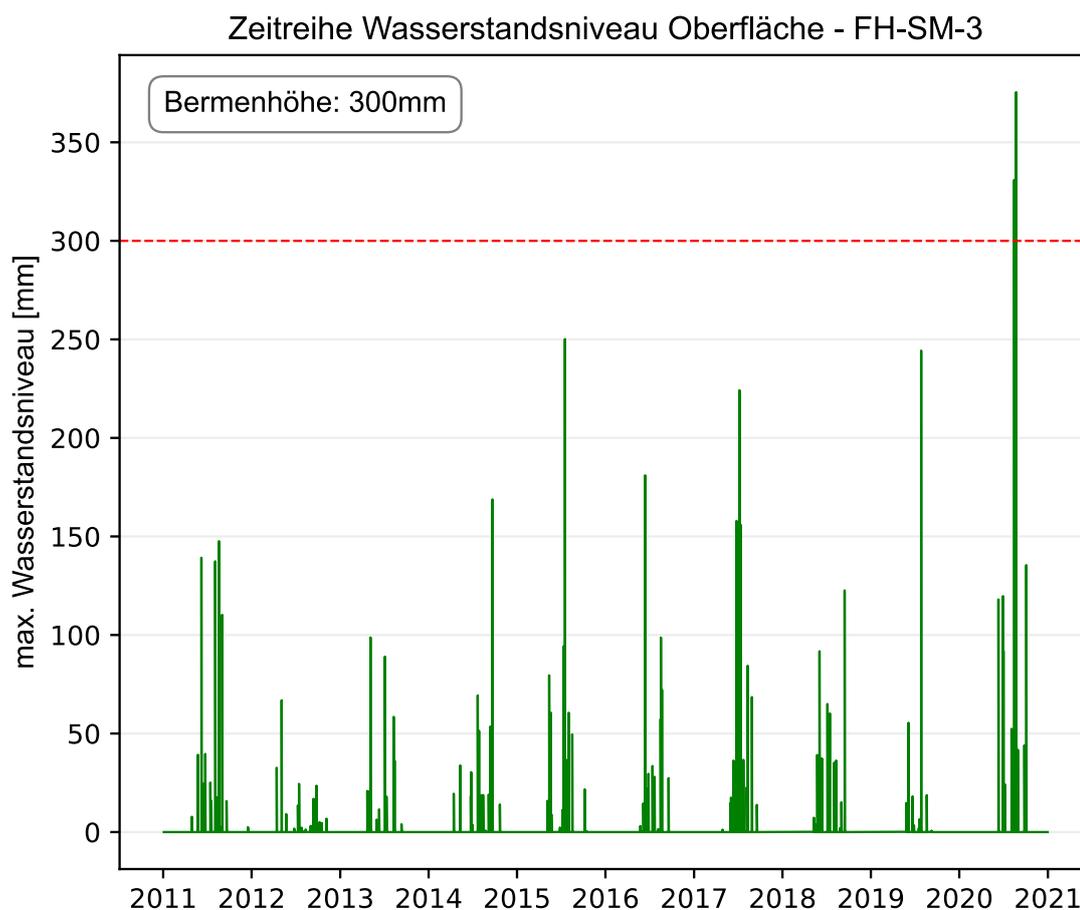


Abbildung 4-19: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SM-3 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 23m² (Friedhof)

Die Auswertung der Abbildung 4-19 zeigt, dass die Wasserstandshöhen maximal 250mm hoch sind. Bis auf einen Ausreißer im Sommer 2020 (ca. 380mm), das durch das Extremereignis (vgl. 3.9) vom 22.08.2020 zurückzuführen ist, sind die Kapazitäten nicht überschritten und es herrscht Erschließungspotenzial.

Die in Unterkapitel 4.4.3 erwähnte Vermutung, dass die erhöhte Versickerungs- und Verdunstungsleistung der FH-SM-3 auf die geringe Erschließung der beiden BGI-Maßnahmen zurückzuführen ist, bestätigt sich mit der Auswertung der Wasserstandshöhen der beiden Sickermulden.

FH-SM-3 bekommt auf einer Fläche von 23 m² absolut gesehen einen Zufluss an Wasser von 366 m³. Während 154 m³ verdunsten, versickern 199 m³ und 13 m³ werden als Abfluss abgeleitet (vgl. Abbildung 4-11).

4.5.1.5 Auswertung Wasserstandniveau FH-SfP-1

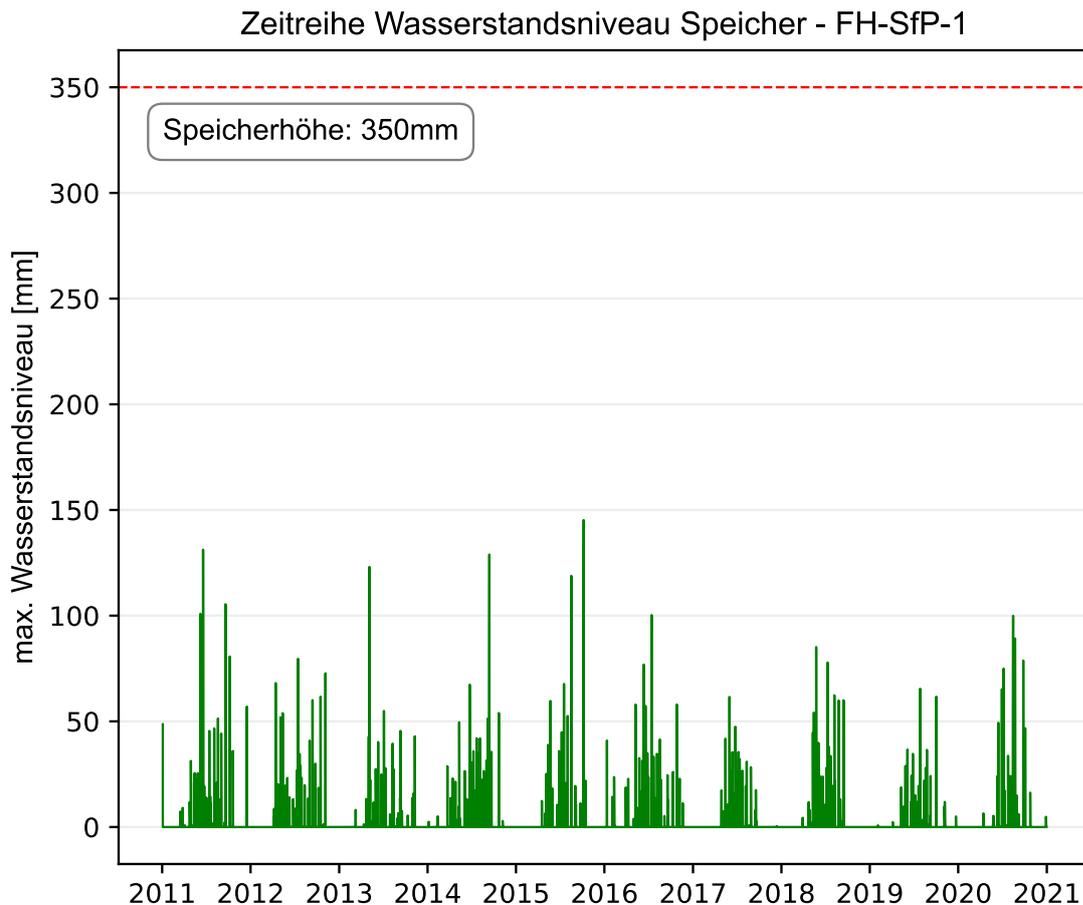


Abbildung 4-20: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SfP-1 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Sickerfähiger Parkplatz mit 50m² (Friedhof)

Die gleiche Situation wie im vorherigen FH-SfP-2 (vgl. 4.5.1.3) ist in der Abbildung 4-20 ebenso zu sehen. Die maximale Speicherhöhe beträgt lediglich in etwa 145mm und wird in der zehnjährigen Simulation nur einmal erreicht. Hier besteht ebenso Potenzial, mehr Flächen anzuschließen, um den Speicher sowie die BGI-Maßnahme FH-SM-2 effizienter auszunutzen, da das überschüssige Wasser des FH-SP-1 an die BGI-Maßnahme FH-SM-2 (vgl. 4.5.1.6) weitergeleitet wird.

Die in Unterkapitel 4.4.3 erwähnte Vermutung, dass die erhöhte Versickerungs- und Verdunstungsleistung der FH-SM-2 auf die geringe Erschließung (vgl. Tabelle 4-2) der beiden BGI-Maßnahmen zurückzuführen ist, bestätigt sich mit der Auswertung der Wasserstandhöhen der beiden Sickermulden.

Die Fläche von FH-SfP-1 beträgt 50 m². Absolut gesehen beträgt der Zufluss 2190 m³, wobei 3 m³ durch Verdunstung verloren gehen, während 1920 m³ versickern und 275 m³ als Abfluss abgeleitet werden (vgl. Abbildung 4-11).

4.5.1.6 Auswertung Wasserstandniveau FH-SM-2

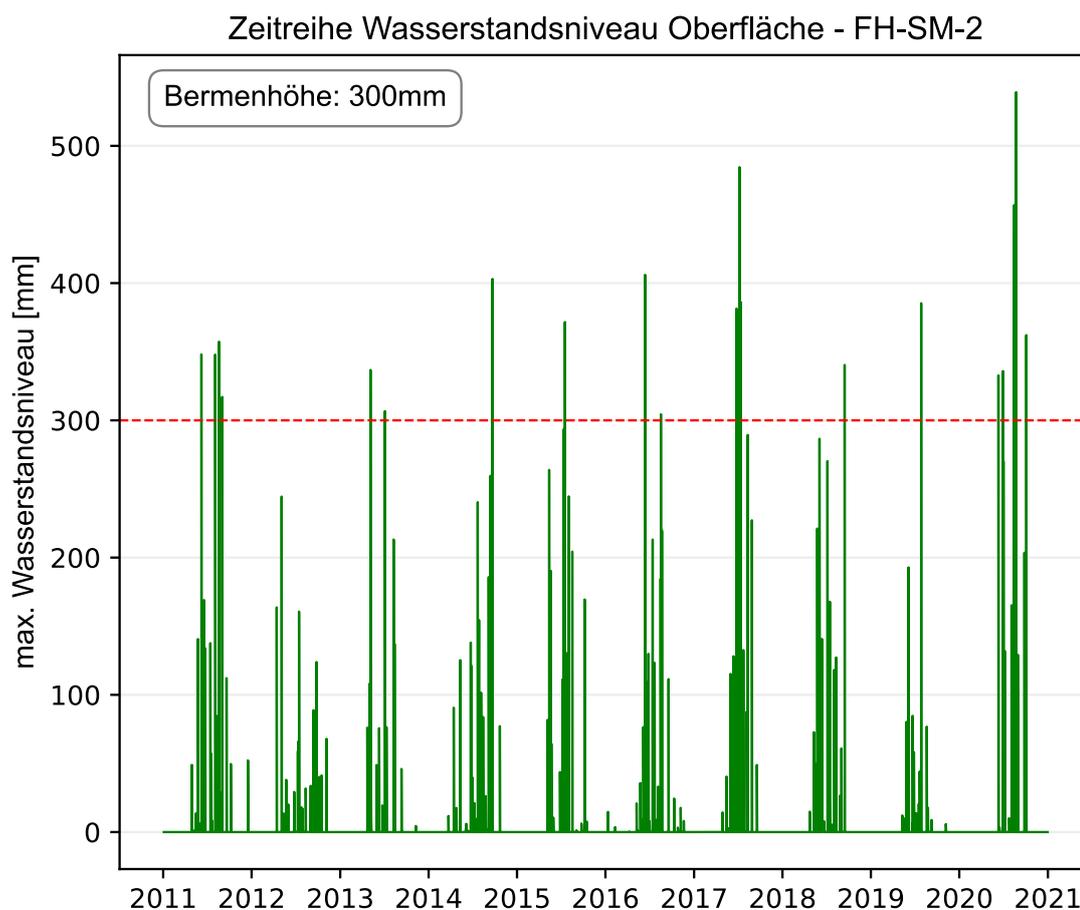


Abbildung 4-21: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SM-2 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Sickermulde mit 12.5m² (Friedhof)

Die Kapazitätsgrenze von FH-SM-2 von 300 mm Stauhöhe wird jährlich bis zu sechs Mal überschritten. Es ist wichtig anzumerken, dass das Oberflächenwasser, das nicht in den Speicher des sickerfähigen Parkplatzes FH-SfP-1 gelangt, in die Sickermulde FH-SM-2 abfließt. Da FH-SfP-1 jedoch nie überlastet ist (vgl. 4.5.1.5), fließt somit kein überschüssiges Wasser in diese BGI-Maßnahme. Dies legt nahe, dass zu viele Flächen an diese BGI-Maßnahme angeschlossen sind und es effizienter wäre, die Flächen vorher an FH-SfP-1 anzuschließen. Eine Überprüfung des Aufbaus und der Größe dieser Sickermulde FH-SM-2 könnte ebenfalls in Betracht gezogen werden, da das Wasser möglicherweise nicht schnell genug versickern und verdunsten kann.

FH-SM-2 erhält laut Abbildung 4-11 mit einer Fläche von 12,5 m² einen Zufluss von 428 m³. Davon verdunsten 89 m³, 268 m³ versickern und 71 m³ werden abgeleitet. Die Vermutung aus 4.4.1 lässt schließen, dass trotz der geringen angeschlossenen Nettofläche eine hohe Abflussleistung vorliegt. Dennoch ist der absolute Abfluss aufgrund der kleinen Fläche von FH-SM-2 nicht so groß.

4.5.1.7 Auswertung Wasserstandniveau FH-SM-1

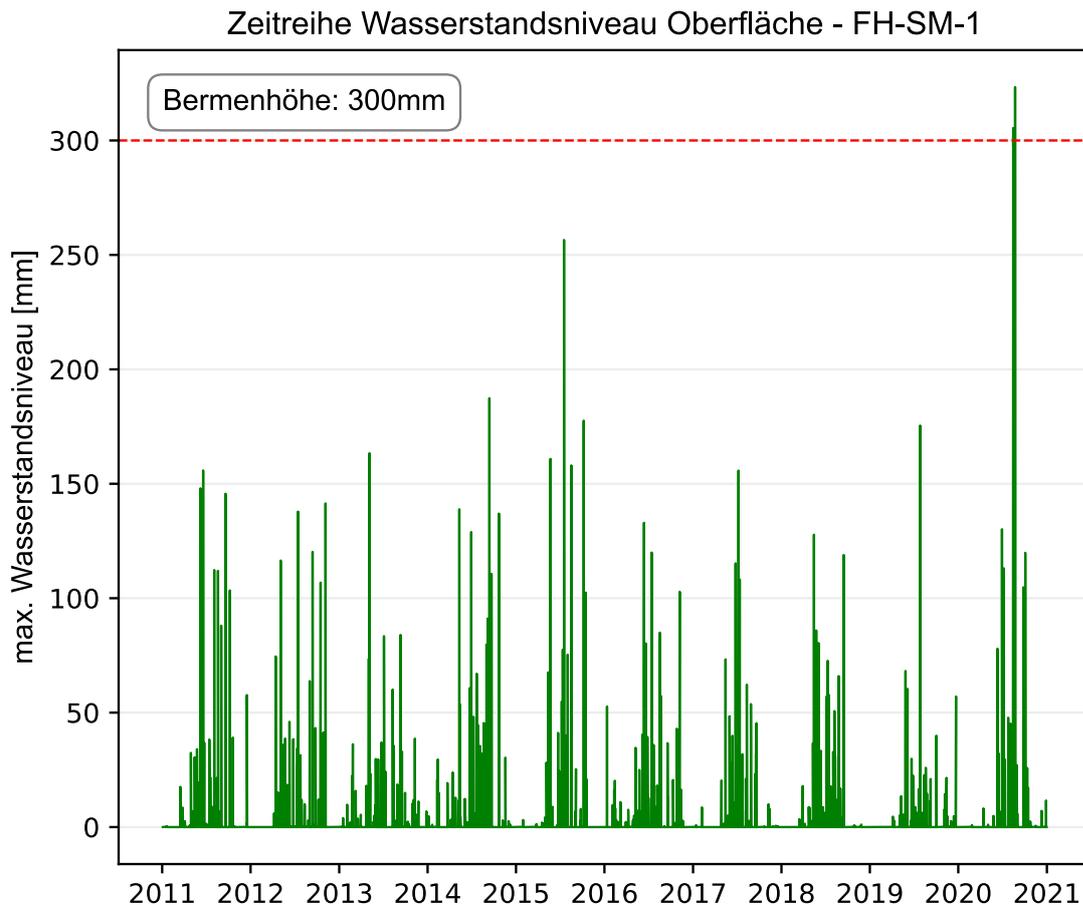


Abbildung 4-22: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet FH-SM-1 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sicker- mulde mit 196m² (Friedhof)

Die Auswertung der Abbildung 4-22 zeigt, dass hier die Wasserstandsniveaus zu- meist maximal 170mm hoch sind. Bis auf einen Ausreißer im Sommer 2015 (ca. 260mm) sowie zwei Ausreißer im Sommer 2020 (ca. 330mm) sind die Ergebnisse gut und die angeschlossenen Flächen scheinen gut zu passen. Das Wasser kann somit rechtzeitig versickern bzw. verdunsten.

Mit einer Fläche von 196 m² empfängt FH-SM-1 einen Zufluss von 8594 m³. Wäh- rend 1579 m³ verdunsten, versickern 6987 m³ und nur 33 m³ werden als Abfluss abgeleitet.

Vergleicht man das Verhältnis der angeschlossene Nettofläche zur Größe der BGI-Maßnahme aus der Tabelle 4-2, scheint der Wert von 4,0 [-] ein angemessenes Verhältnis zu sein.

4.6 Auswertungen der Teilfläche „Kelly“

4.6.1 Kanalabschnitt KLY-KS-1

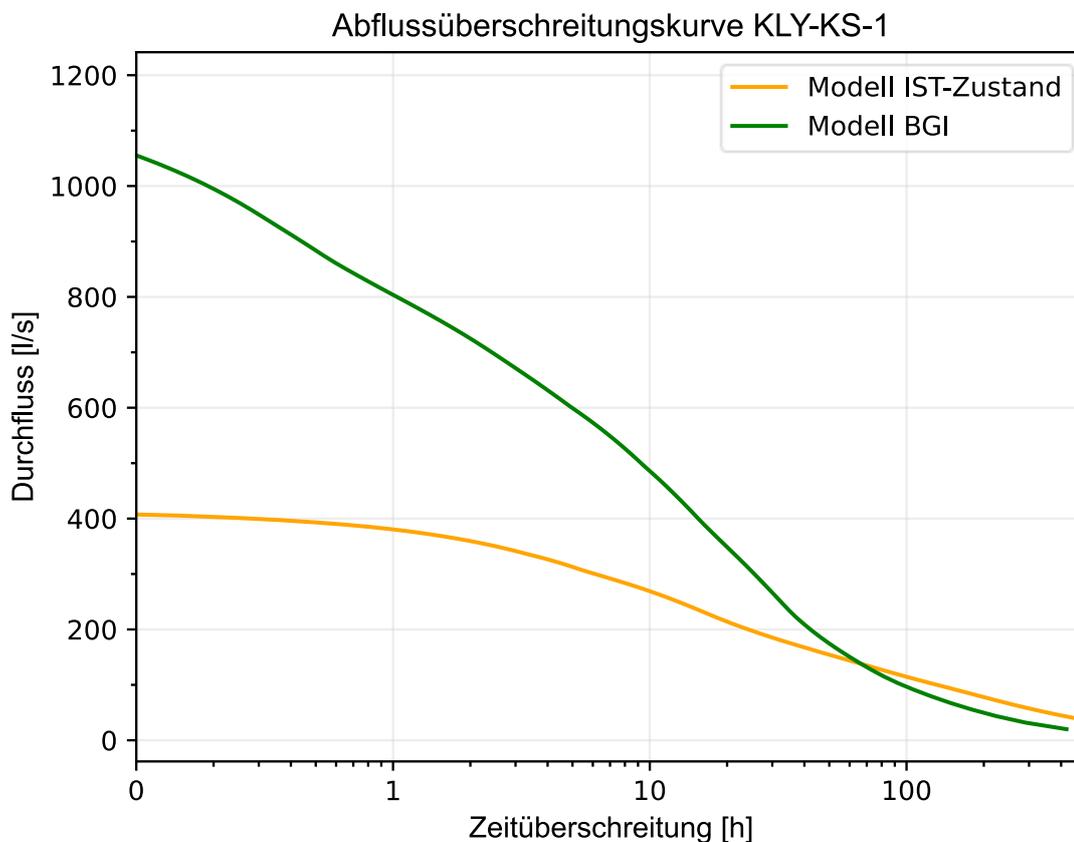


Abbildung 4-23: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt KLY-KS-1

Die Abbildung 4-23 zeigt, dass das Modell mit den blau-grünen Infrastrukturmaßnahmen im Vergleich zum IST-Zustand bereits ab einer Abflussmenge von etwa 100 l/s eine deutlich höhere durchschnittliche Abflussmenge aufweist. Dies könnte daran liegen, dass mehr Flächen an den Kanalstrang und die davor liegenden Kanalschächte angeschlossen sind, was zu deutlich höheren Abflüssen führt. Dies ist auch aus der Tabelle 4-2 ersichtlich, dass das Verhältnis zwischen angeschlossener Nettofläche und der Größe der BGI-Maßnahme beim Kelly recht hoch ist. Ebenso wird das Potenzial der Aufnahme von Wasser durch die Grünflächen aufgrund der Umleitung der Flächen zu den BGI-Maßnahmen weniger ausgenutzt. Es scheint so, dass so viel mehr Niederschlags- und Oberflächenwasser zu den BGI-Maßnahmen fließt und es zu einer Überlastung der beiden BGI-Maßnahmen (vgl. Abbildung 4-24 & Abbildung 4-25) und zu einem signifikant höheren Abfluss im Kanalstrang KLY-KS-1 führt. Wenn die Kapazitätsgrenze der beiden Sickermulden überschritten wird, wird das überschüssige Regenwasser konzentrierter in den Schacht des Kanalstrangs KLY-KS-1 abgeleitet.

Das Ziel, Abflüsse und Abflussspitzen in diesem Kanalstrang zu minimieren, wird hier nicht erreicht. Eine Reduzierung der Erschließung der BGI-Maßnahmen und eine bessere Nutzung der Grünflächen, wie im IST-Modell, könnten diesen Kanalstrang und die umliegenden Kanalschächte entlasten. Es wären jedoch weitere Analysen dieser konkreten Kanalschächte und Kanalstränge erforderlich.

4.6.1.1 Auswertung Wasserstandniveau KLY-SM-2

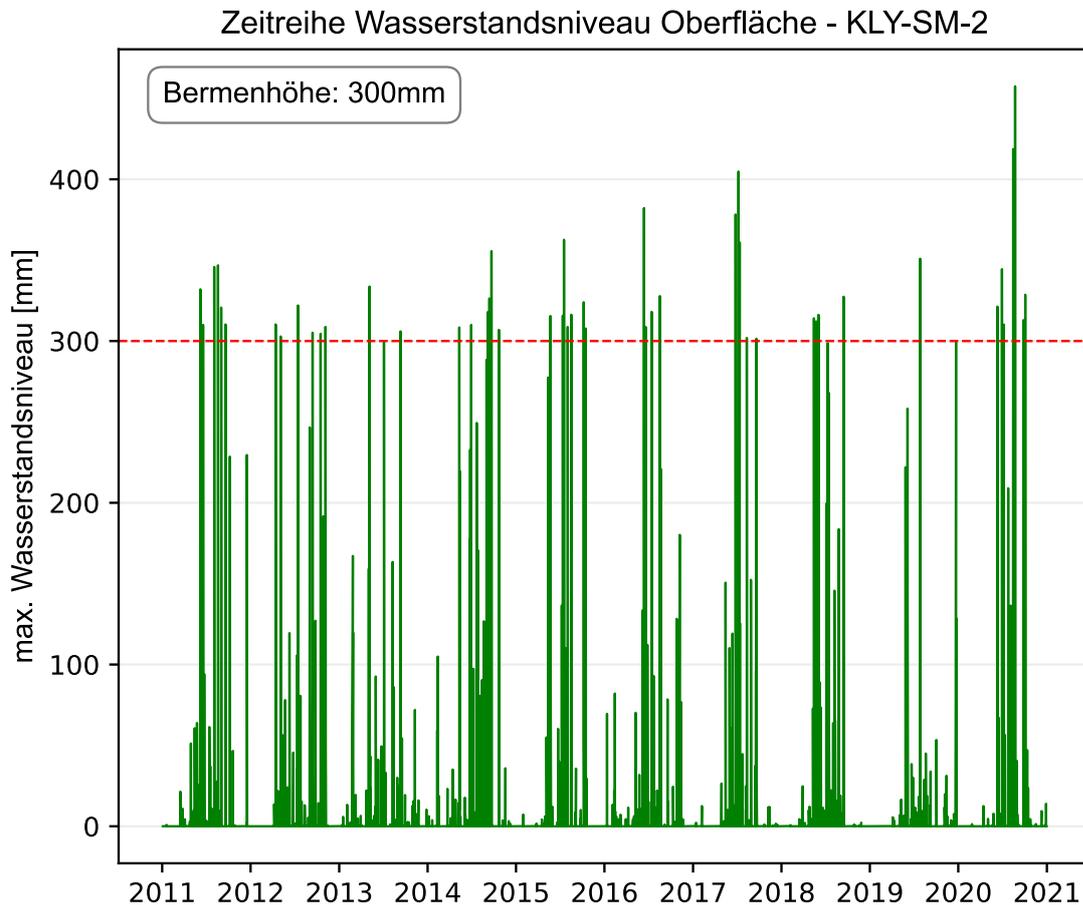


Abbildung 4-24: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet KLY-SM-2 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 145m² (Kelly)

Das KLY-SM-2 in der Nähe des Kelly zeigt deutlich, dass die Kapazitätsgrenze von 300 mm Stauhöhe häufig überschritten wird. Die hohe Abflussleistung (vgl. Abbildung 4-12), die im Unterkapitel 4.4.1 beschrieben ist, wird somit bestätigt. Es deutet darauf hin, dass zu viele Flächen an diese Sickermulde angeschlossen sind, was dazu führt, dass das Wasser nicht ausreichend schnell verdunsten oder versickern kann, wie bereits in 4.6.1 vermutet. Daher erfolgt eine konzentriertere Einleitung in den Kanalstrang KLY-KS-1 und es führt zu höheren Abflüssen, da im BGI-Modell mehr Flächen an den KLY-KS-1 angeschlossen sind, als im IST-Modell. Um die Überlastung zu vermeiden, könnte die angeschlossene Fläche reduziert oder der Aufbau der BGI-Maßnahme modifiziert werden. Durch gezielte

Modifikationen könnten noch effektivere Verbesserungen erzielt werden. Es ist anzumerken, dass wenn sich Wasser ansammelt, dies auch zu einer guten Verdunstung und Versickerung führen kann. Dies bestätigen auch die Versickerungs- und Verdunstungsleistungen aus der Abbildung 4-13 und der Abbildung 4-14. Mit einer Fläche von 145 m² hat KLY-SM-2 einen Zufluss von 11284 m³, eine Verdunstung von 1188 m³, eine Versickerung von 7826 m³ und den zweitgrößten Abfluss aller BGI-Maßnahmen von 2272 m³ (vgl. Abbildung 4-11).

4.6.1.2 Auswertung Wasserstandniveau KLY-SM-1

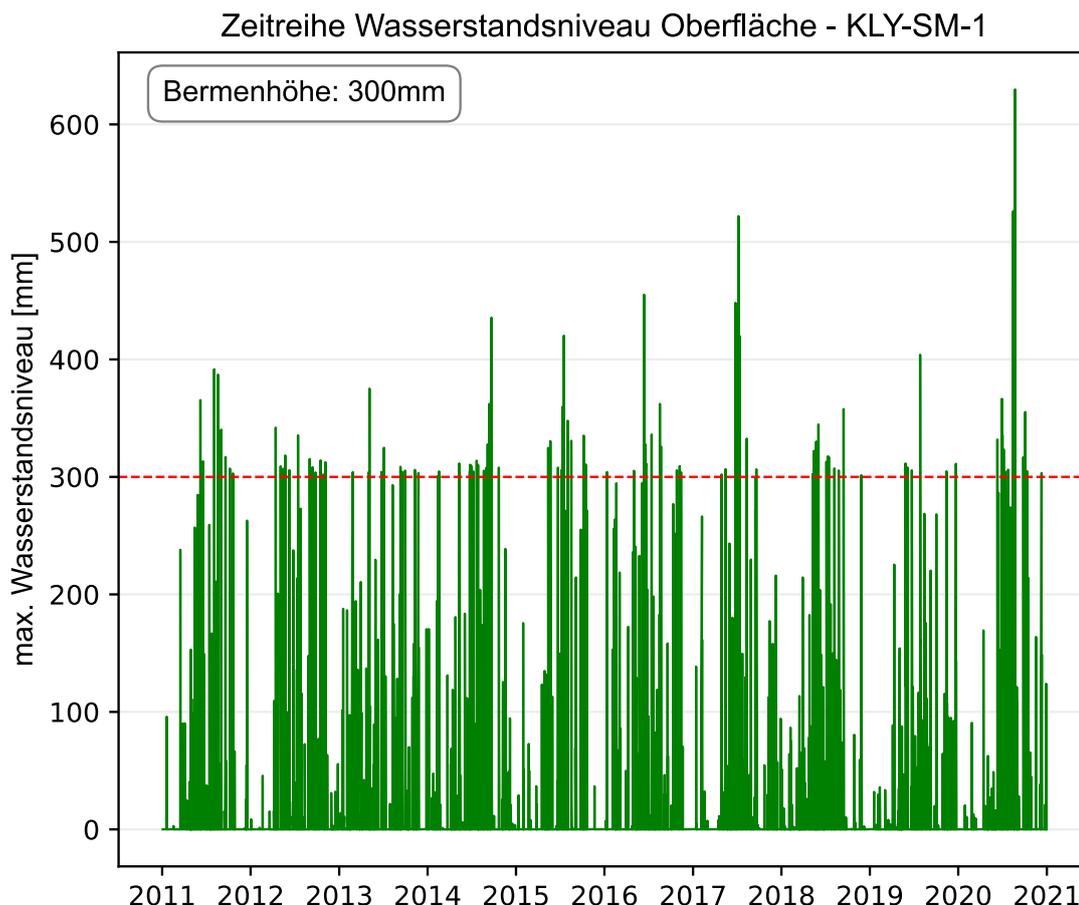


Abbildung 4-25: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet KLY-SM-1 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 103m² (Kelly)

Wie in der Abbildung 4-24 ist auch hier in der Abbildung 4-25 die Kapazitätsgrenze sehr oft erreicht. Es sind zu viele Flächen an das KLY-SM-1 angeschlossen und das überschüssige Wasser kann nicht rechtzeitig versickern bzw. verdunsten. Sobald die maximale Bermenhöhe von 300mm erreicht ist, wird das Wasser auch hier in den nahegelegenen Kanal KLY-KS-1 konzentriert abgeleitet.

Laut Abbildung 4-11 erstreckt sich KLY-SM-1 über 103 m². Der Zufluss beträgt insgesamt 17624 m³, das im Vergleich zu den anderen BGI-Maßnahmen sehr hoch ist. Dies spiegelt sich am Abfluss mit insgesamt 4667 m³ wider, der von

allen BGI-Maßnahmen bei weitem der Größte ist. Die Verdunstung mit 902 m^3 und die Versickerung mit 12058 m^3 zeigen, wie vorhin erwähnt, sehr gute Ergebnisse, da das Wasser sehr oft ansteht.

4.7 Auswertungen der Teilfläche „Gemeindebau“

Die Kanalstränge GB-KS-1 und GB-KS-4 werden an der Kreuzung der Oedter Straße, der Oswaldigasse und des Alois-Harntodt-Weg im Hauptkanalschacht zusammengeführt.

Von dort fließt der gesammelte Regenabfluss parallel gebündelt in die Kanalstränge GB-KS-2 und GB-KS-3 und weiter in Richtung Oedterbach (OB-KS-2) (vgl. Abbildung 3-7). Das Umleiten von Flächen zu den einzelnen Maßnahmen der Blau-Grünen Infrastruktur (BGI) im Rahmen des Maßnahmenpakets „Gemeindebau“ führt ebenfalls zu höheren Abflüssen (vgl. Abbildung 4-28), wie es beim Kanalstrang des KLY-KS-1 (vgl. 4.6.1) der Fall ist.

Vermutlich trifft dabei der Effekt auf, dass Flächen in die BGI-Maßnahmen umgeleitet werden und dadurch Grünflächen, die eigentlich in der Lage sind, viel Wasser aufzunehmen (vgl. 3.4.4), weniger genutzt werden. Durch bauliche Maßnahmen wird das Niederschlagswasser direkt zu den BGI-Maßnahmen geleitet, was dazu führen kann, dass das Potenzial der Grünflächen nicht ausgeschöpft wird und zu einer Überlastung der BGI-Maßnahmen führt. Das Ziel, Abflüsse und Abflussspitzen in diesen spezifischen Kanalsträngen (GB-KS-1 und GB-KS-4) zu minimieren, wird hier bei größeren Ereignissen nicht erreicht. Dies ist vermutlich deswegen der Fall, da die BGI-Maßnahmen bis zum Erreichen der Kapazitätsgrenze Niederschlagswasser gut verarbeiten können, bei Überschreiten der Grenze aber konzentriert die Kanalstränge belasten. Die Ergebnisse der einzelnen BGI-Maßnahmen und der einzelnen Kanalstränge werden nachfolgend beschrieben.

Laut Abbildung 4-11 hat die blau-grüne Infrastrukturmaßnahme GB-SM-1 eine Fläche von 122 m^2 . Sie erhält einen Zufluss von 8512 m^3 , wobei 1050 m^3 verdunsten, während 7375 m^3 versickern. Lediglich 91 m^3 werden als Abfluss abgeleitet, was auf eine gute Erschließung hindeutet. Ähnlich strukturiert ist GB-SM-2, allerdings mit einem etwas geringeren Zufluss von 7396 m^3 und einem etwas höheren Abfluss von 136 m^3 . Im Gegensatz dazu hat GB-SM-3 eine Fläche von 60 m^2 . Hier ist 8279 m^3 Zufluss, davon verdunsten 526 m^3 , 6744 m^3 versickern und 1011 m^3 fließen als Abfluss ab. Dies ist sehr hoch und wird auch in der Tabelle 4-2 mit einem Wert von $14,9 [-]$ bestätigt, dass zu viel Fläche an diese BGI-Maßnahme angeschlossen ist. Schließlich weist die BGI-Maßnahme GB-SM-4 eine Fläche von 38 m^2 auf und erhält einen Zufluss von 2020 m^3 . Davon verdunsten 313 m^3 , während 1654 m^3 versickern. Der Abfluss beläuft sich auf 55 m^3 .

4.7.1 Kanalabschnitt GB-KS-1

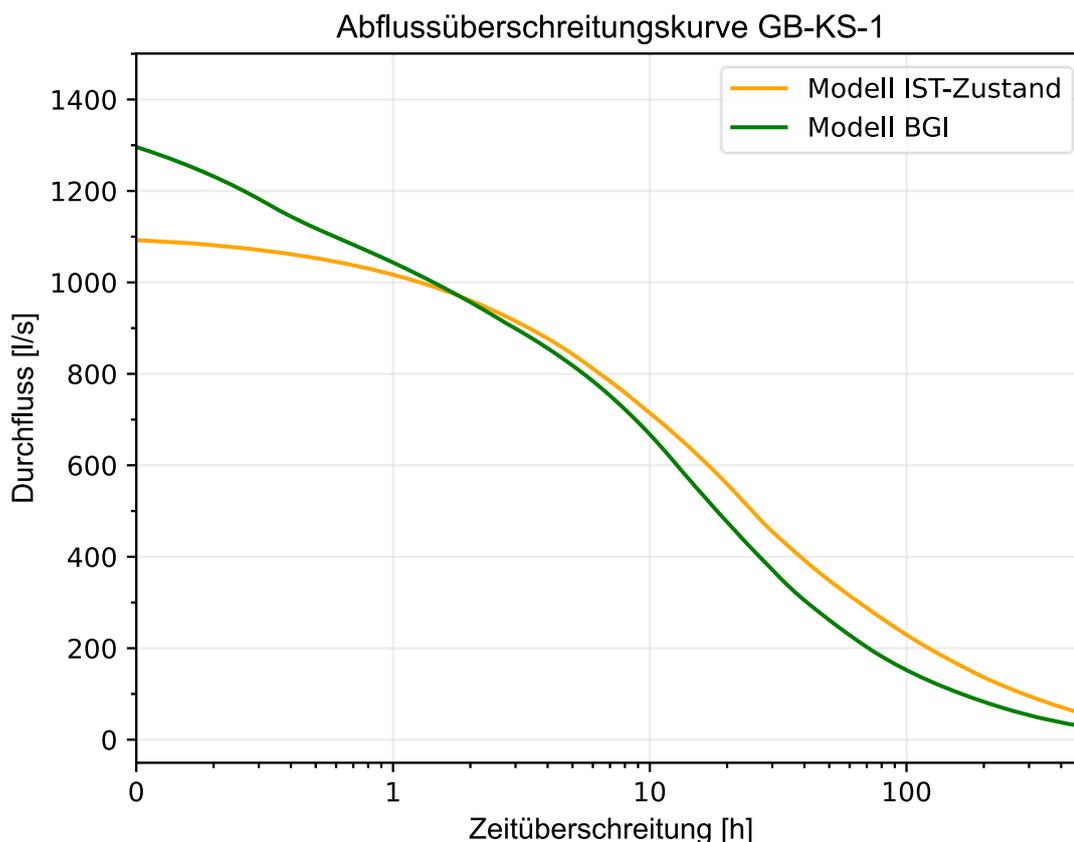


Abbildung 4-26: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt GB-KS-1

In den Kanalstrang GB-KS-1 fließt das Oberflächen- und Niederschlagswasser der Flächen des Gebietes „Kelly“, ehe es weiter in die parallelen Kanalstränge GB-KS-2 und GB-KS-3 weitergeleitet wird. Wie bereits in 4.6.1 beschrieben, wirkt sich die verstärkte Einleitung durch die Erschließung mehrerer Flächen auf den Abfluss des Kanalstranges KLY-KS-1. Dabei tritt der bereits beschriebene Effekt auf, dass das Umleiten von Flächen zu den BGI-Maßnahmen beim Kelly dazu führt, dass das Potenzial der Grünflächen nicht voll ausgeschöpft wird, was zu einer Überlastung der BGI-Maßnahmen bei höheren Ereignissen führt, insbesondere wenn die Kapazitätsgrenzen der BGI-Maßnahmen erreicht werden und sich so nachteilig auf den Kanalstrang beim Kelly auswirkt. Durch die Einleitung in den Kanalstrang des Gemeindebaus GB-KS-1 steigen auch die Abflüsse in diesem Bereich an.

4.7.1.1 Auswertung Wasserstandniveau GB-SM-4

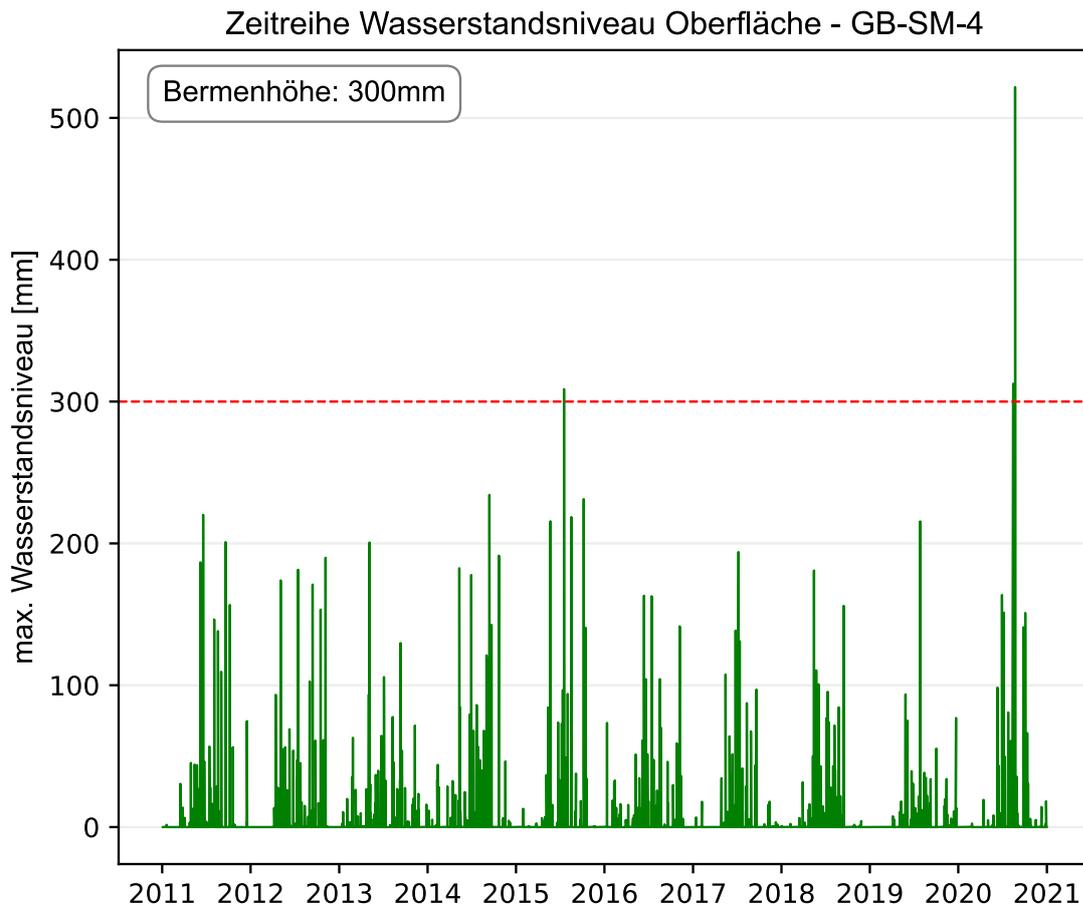


Abbildung 4-27: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet GB-SM-4 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sicker- mulde mit 38m² (Gemeindebau)

Auf dieser Abbildung 4-27 ist die Sickermulde GB-SM-4 zu erkennen, die in den Kanalstrang GB-KS-1 einleitet. Das Wasser steht zumeist bis maximal 200 mm an. Lediglich im Sommer 2015 gibt es ein Ereignis, das die Kapazitätshöhe von 300 mm übersteigt. Im Jahr 2020 sind es zwei Ereignisse, eines davon das Extremereignis vom 22.08.2020 (vgl. 3.9), die die Kapazitätsgrenze übersteigt. Man kann somit sagen, dass der Aufbau und die Erschließung für diese BGI-Maßnahme gut gewählt ist und sogar noch Kapazität vorhanden ist, mehr Flächen an diese BGI-Maßnahme anzuschließen.

Durch den Vergleich von Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14 lässt sich feststellen, dass die gute Erschließung zu sehr guten Ergebnissen bei der Verdunstungs- und Versickerungsleistung führt. Dies ist auf die guten Zuflüsse sowie die niedrigen Abflüsse (vgl. Abbildung 4-11) zurückzuführen, da die Kapazitätsgrenzen selten erreicht werden.

4.7.2 Kanalabschnitt GB-KS-4

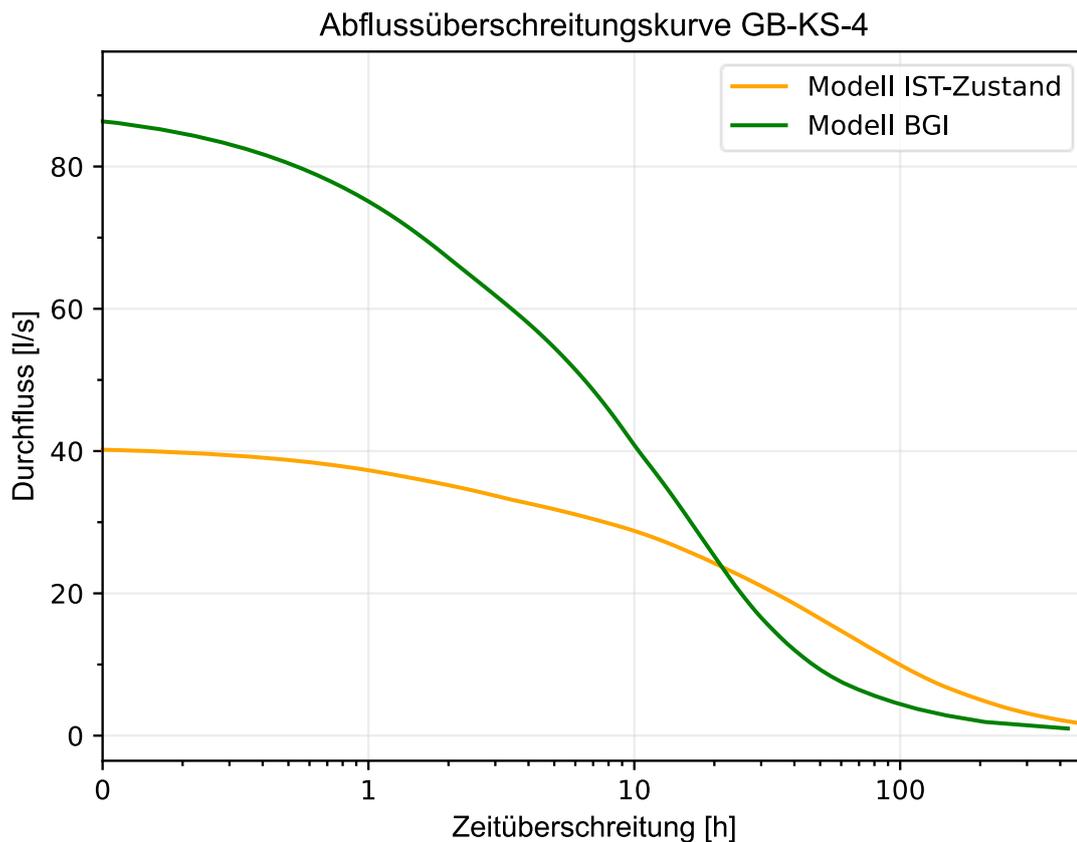


Abbildung 4-28: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt GB-KS-4

In dieser Abbildung 4-28 ist die Abflussüberschreitungskurve des Kanalabschnittes GB-KS-4 angezeigt.

Wie vorhin (4.7) bereits geschildert, sind im Modell mit BGI-Maßnahmen wesentlich mehr Flächen an den Kanalstrang GB-KS-4 angeschlossen, als im Modell des IST-Zustandes, da das Potenzial der umliegenden Grünflächen weniger ausgenutzt werden. Konkret geht es um die versiegelten Flächen bzw. Parkflächen beim Gemeindebau, die anders wie im IST-Modell, nicht mehr an die grüne Wiese angeschlossen sind. Diese Flächen werden im BGI-Modell vor ihrer Einleitung in den Kanalstrang durch die BGI-Maßnahme GB-SM-3 aufgenommen, welche das Niederschlags- und Oberflächenwasser großer Gemeindebauflächen sammelt. Dabei zeigt sich, dass das BGI-Maßnahmenmodell im Durchschnitt eine wesentlich höhere Abflussmenge aufweist, insbesondere ab einer Abflussmenge von etwa 25 l/s im Vergleich zum IST-Zustand. Eine genauere Analyse von GB-SM-3 in Unterkapitel 4.7.2.1 verdeutlicht, dass diese BGI-Maßnahme oft an ihre Kapazitätsgrenze stößt, was dazu führt, dass das Wasser konzentriert aus der Sickermulde in den Schacht und anschließend in den Kanal abfließen kann.

4.7.2.1 Auswertung Wasserstandniveau GB-SM-3

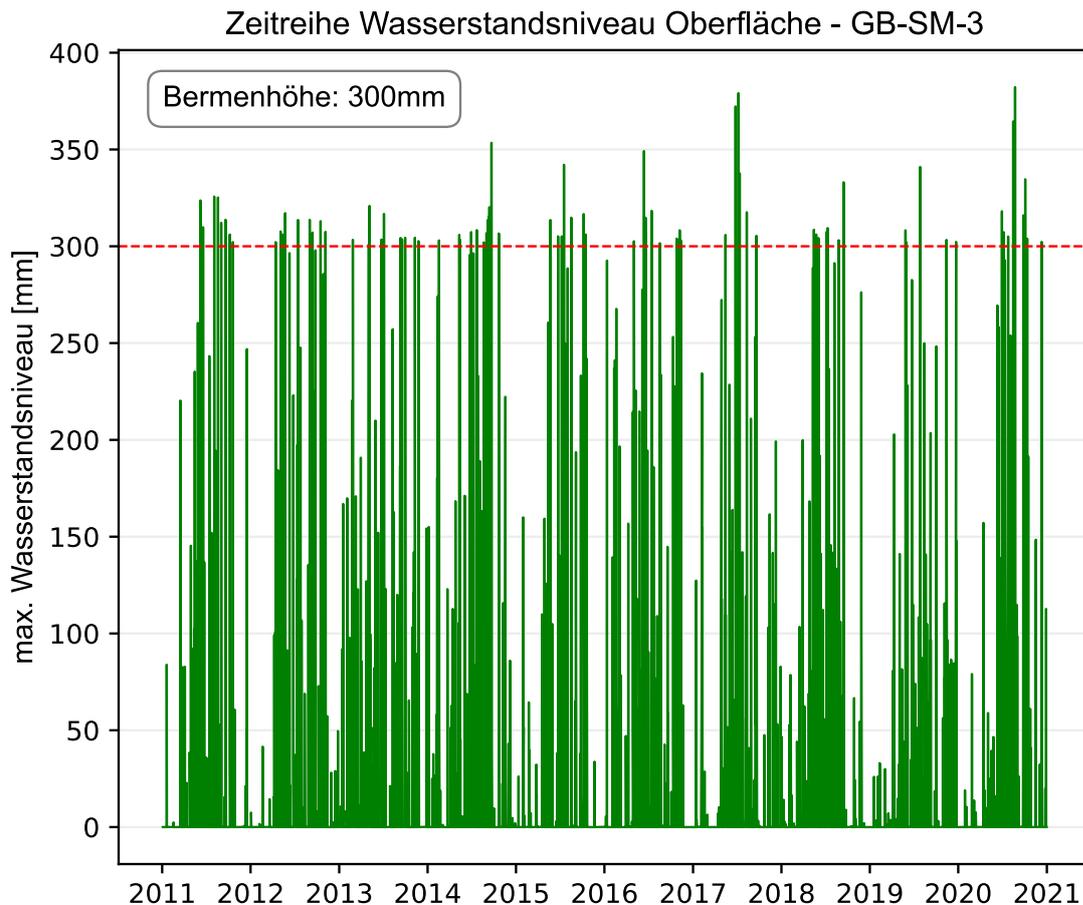


Abbildung 4-29: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet GB-SM-3 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 60m² (Gemeindebau)

Wie zuvor bereits geschildert, befindet sich GB-SM-3 im Gemeindebau und ist an den Kanalstrang GB-KS-4 angeschlossen. Die Abbildung 4-29 zeigt, dass die Wasserstände vor allem in den Sommermonaten häufig die maximale Wasserstandshöhe von 300 mm erreichen. Infolgedessen tritt das Wasser aus und fließt an die umliegenden Flächen, bevor das Oberflächenwasser schließlich in den nahegelegenen Kanal GB-KS-4 gelangt. Dies legt nahe, dass zu viele Flächen an diese Sickermulde angeschlossen sind und eine Anpassung des Aufbaus, der Anschlüsse oder der Größe der BGI-Maßnahme erforderlich ist. Diese Situation führt dazu, dass deutlich mehr Wasser, nach Erreichen der Kapazitätsgrenze, direkt in den nahegelegenen Kanal abgeleitet wird, was wiederum zu höheren Durchflussmengen im Kanal führt, wie bereits in 4.7.2 beschrieben. Durch die Kapazitätsüberlastung wird aber erreicht, dass sehr gute Verdunstungsleistungen und Versickerungsleistungen (vgl. Abbildung 4-13 & Abbildung 4-14) erreicht werden.

4.7.3 Kanalabschnitt GB-KS-3 und GB-KS-2

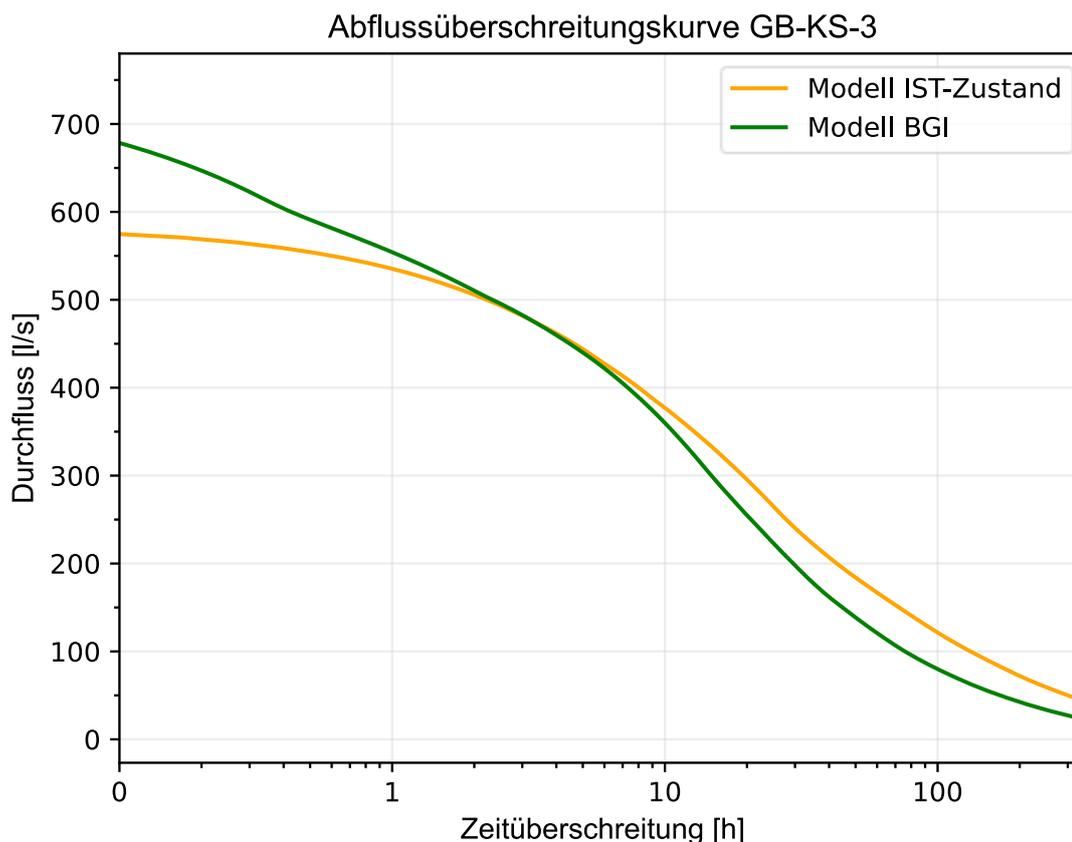


Abbildung 4-30: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt GB-KS-3

Die Abbildung 4-30 zeigt den Verlauf der Abflussüberschreitungskurve des Kanals GB-KS-3, der sich parallel zum Kanal GB-KS-2 befindet (vgl. Abbildung 3-7). Die Abbildung 4-31 zeigt hingegen den Verlauf der Abflussüberschreitungskurve des Kanals GB-KS-2.

Die Flächen des Gebietes „Kelly“ gelangen bereits über die oberen Kanalstränge des Kelly in das System. Hinzu fließen die restlichen großen Flächen des Gebietes „Gemeindebau“ zunächst in die BGI-Maßnahmen, bevor sie in die beiden Kanalstränge GB-KS-3 und GB-KS-2 geleitet werden.

Der Verlauf der Abflussüberschreitungskurven der Kanalstränge GB-KS-3 und GB-KS-2 zeigen, dass die Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur jeweils bei Abflussmengen bis etwa 450 l/s einen geringeren Abfluss im Vergleich zum Modell des IST-Zustandes aufweisen. Jedoch zeigt sich jeweils bei größeren Ereignissen, wo die Abflussmengen über 450 l/s liegen, eine verschlechterte Leistung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mehr Flächen an die BGI-Maßnahmen angeschlossen sind, die Grünflächen weniger ausgenutzt werden und bei Überschreiten der Kapazitätsgrenzen aller BGI-Maßnahmen des Maßnahmenpaketes

„Gemeindebau“ das überschüssige Wasser konzentriert in die Kanalstränge geleitet wird.

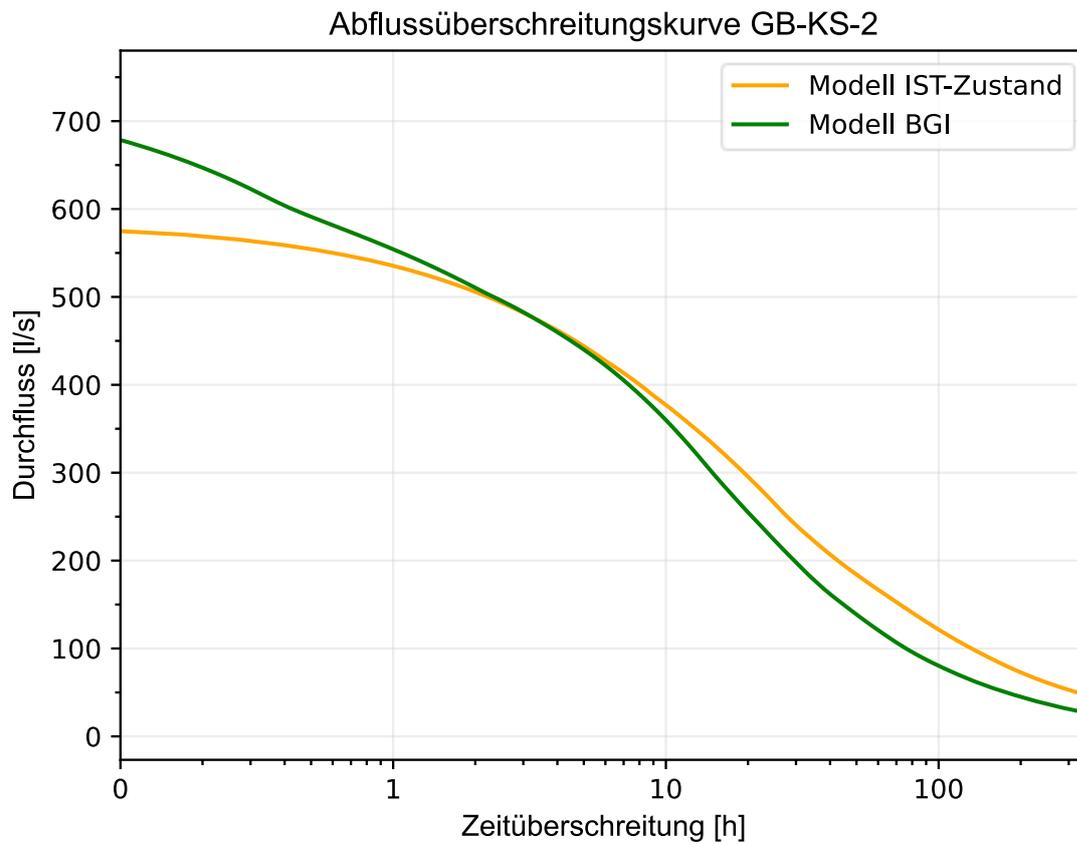


Abbildung 4-31: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt GB-KS-2

4.7.3.1 Auswertung Wasserstandniveau GB-SM-1

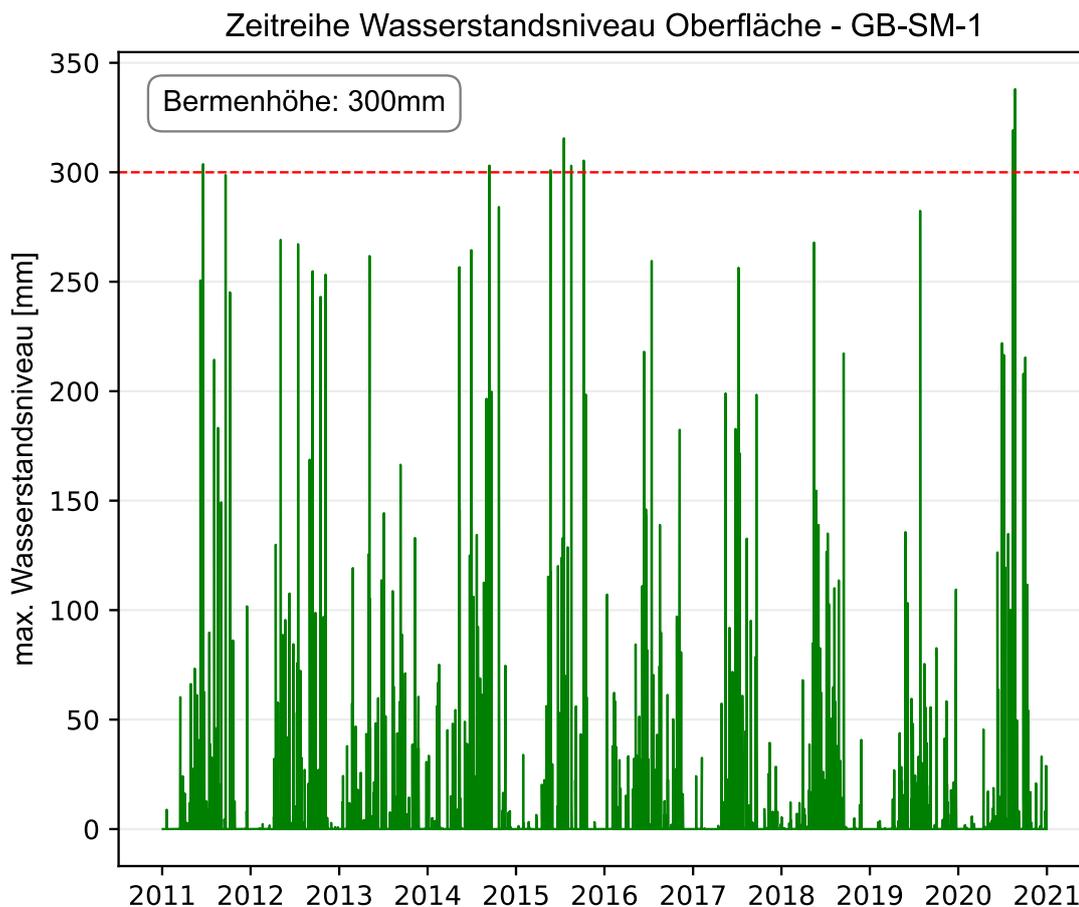


Abbildung 4-32: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet GB-SM-1 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 122m² (Gemeindebau)

Das GB-SM-1 liegt im Gemeindebau und hat eine Bermenhöhe von 300 mm. Man erkennt auf der Abbildung 4-32, dass die Wasserstände oft sehr nahe an die Oberkante der Berme und jährlich selten über die Oberkante kommen (2015 und 2020). Bei Wasserübertritt über die Berme fließt das Wasser dann an die nächste BGI-Maßnahme GB-SM-2. Das GB-SM-2 sollte dann in der Lage sein, sowohl das überschüssige Wasser aus dem TEZG GB-SM-1, als auch die angeschlossenen Flächen aufzunehmen. Es kann gesagt werden, dass die Sickermulde GB-SM-1 effizient und genügend erschlossen ist, da sie zumeist die Kapazitätsgrenze nicht erreicht und genügend Wasser rückstauen kann.

4.7.3.2 Auswertung Wasserstandniveau GB-SM-2

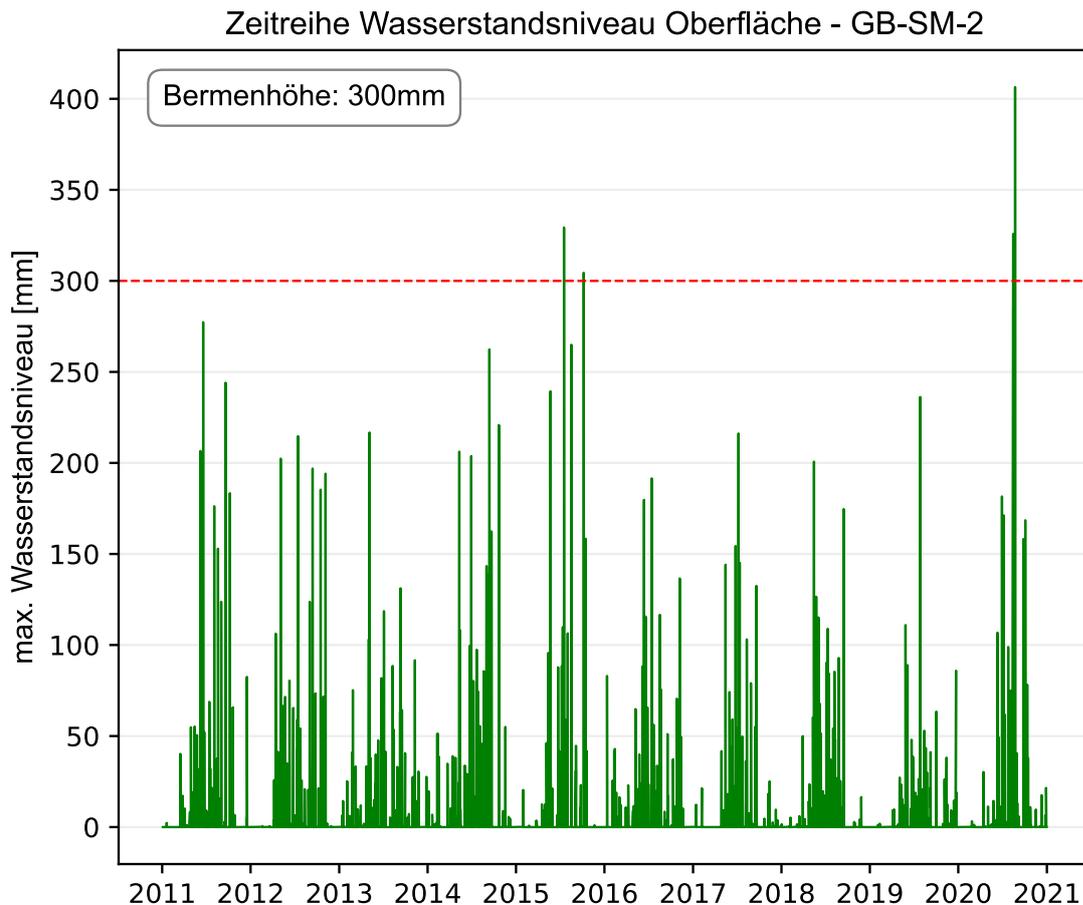


Abbildung 4-33: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet GB-SM-2 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) –Sickermulde mit 122m² (Gemeindebau)

Auf dieser Abbildung 4-33 ist zu erkennen, dass die Wasserstände zum Großteil unter der Kapazitätsgrenze von 300 mm liegen. Lediglich bei vier Ereignissen der zehnjährigen Simulation steigt das Wasser über die Berme und fließt an die umliegende Fläche weiter. Somit kann auch gesagt werden, dass das überschüssige Wasser aus dem GB-SM-1 ebenfalls gut aufgenommen wird und lediglich bei Ausnahmefällen, wie beispielsweise im Jahr 2015 und 2020, über die Bermenoberkante austritt. 2015 und 2020 tritt das Wasser im GB-SM-1 aus und fließt in diese Sickermulde GB-SM-2 und führt somit auch in dieser Sickermulde zu überschüssigem Wasser.

4.8 Auswertungen der Teilfläche „Oedterbach“

4.8.1 Kanalabschnitt OB-KS-1

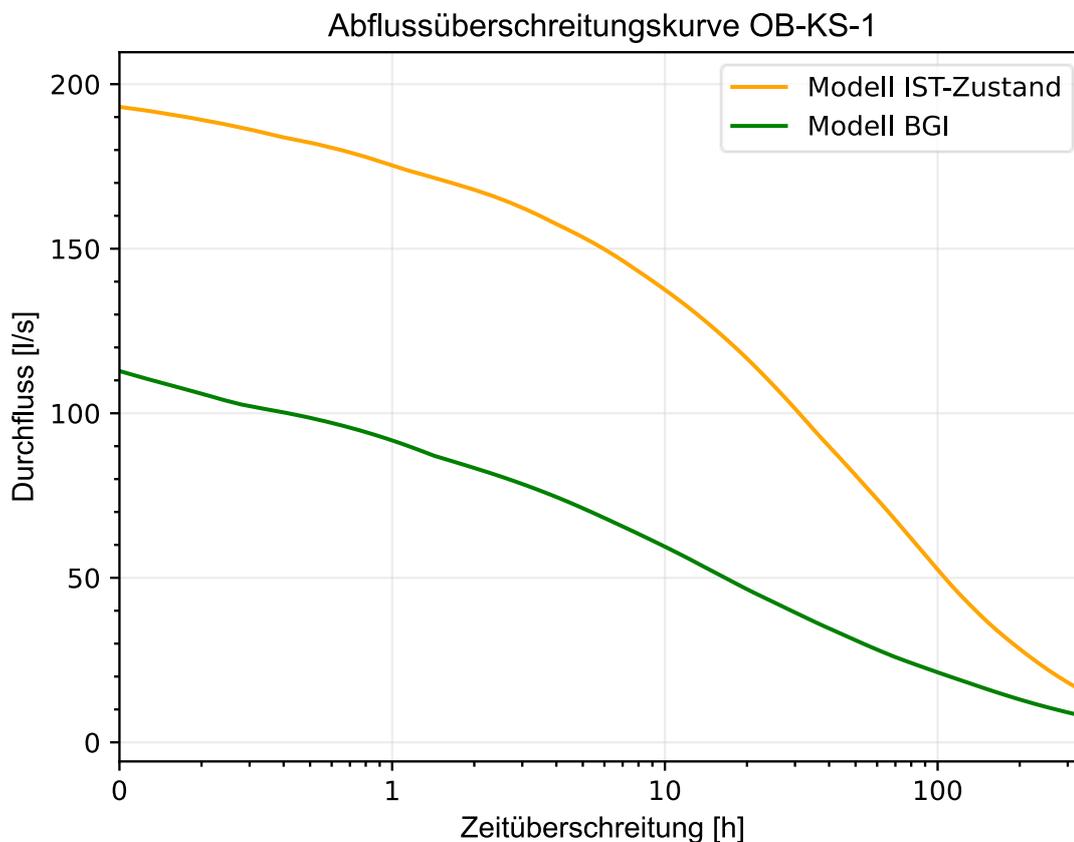


Abbildung 4-34: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt OB-KS-1

Der Verlauf der Abflussüberschreitungskurve des Kanalstranges OB-KS-1, der sich in der Oswaldigasse befindet, zeigt, dass die Maßnahme der BGI eine kontinuierliche Verbesserung auf den Abfluss hat, unabhängig von der Größe des hydrologischen Ereignisses. Einige Flächen, die im IST-Modell in den Kanalstrang OB-KS-1 einleiten, leiten im BGI-Modell in den OB-RM-1 (Regengarten) ein und entlasten somit den Kanalabschnitt deutlich. Sowohl bei kleinen Ereignissen mit Abflussmengen von nur 10 l/s, als auch bei größeren Ereignissen und höheren Abflussmengen zeigen sich in diesem Kanalabschnitt deutliche Verbesserungen.

4.8.1.1 Auswertung Wasserstandniveau OB-RM-1

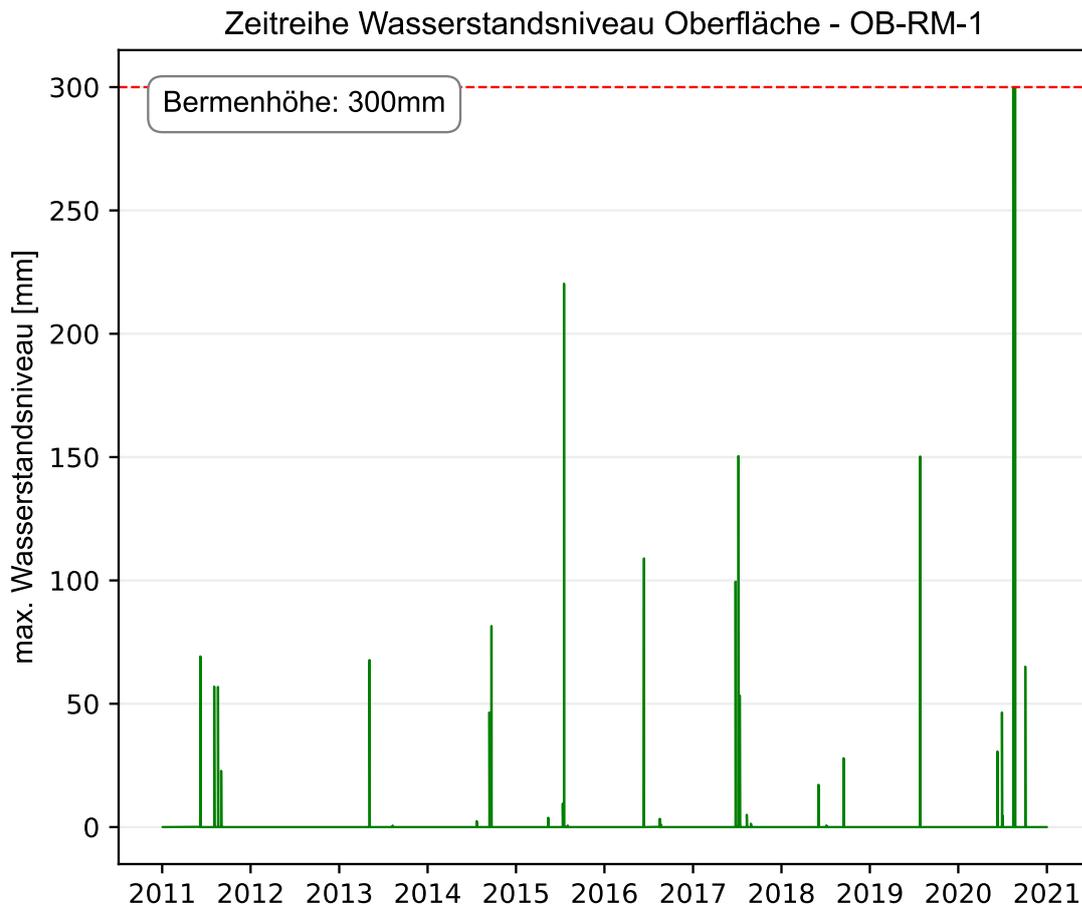


Abbildung 4-35: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet OB-RM-1 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Regengarten mit 450m²

Die Abbildung 4-35 zeigt, dass das Wasser in der BGI-Maßnahme im OB-RM-1 bis 2019 nur ein- bis zweimal im Jahr eine Höhe von mehr als 50 mm erreicht. Nur im Jahr 2020, beim Extremereignis (vgl. 3.9), steigt das Wasser bis zur Oberkante der Maßnahme und fließt dann an die umliegenden Flächen ab. Basierend auf dieser Grafik lässt sich sagen, dass die Maßnahme noch erheblich Kapazitätspotenzial aufweist. Dies deutet darauf hin, dass der Regengarten mehr Wasser aufnehmen könnte und somit weitere Flächen für diese BGI-Maßnahme erschlossen werden könnten. Eine weitere Möglichkeit wäre es, die Fläche dieses TEZG zu verkleinern, um etwa Kosten zu sparen. Da aber das Ziel in dieser Masterarbeit bzw. Projekt darin besteht, die Abflusssituation im EZG Feldbach zu verbessern, ist es ratsamer, mehr Flächen zu erschließen.

Trotz Kapazitätspotenzials weist die Regenmulde eine gute Verdunstungs- und Versickerungsleistung (vgl. Abbildung 4-13 & Abbildung 4-14). Laut Abbildung 4-11 hat die BGI-Maßnahme OB-RM-1 eine Gesamtfläche von 450 m². Sie hat einen Zufluss von 17643 m³, eine Verdunstung von 2982 m³, eine Versickerung

von 14417 m³ und einen Abfluss von 239 m³. Durch Erschließung größerer Flächen könnte man dennoch bessere Ergebnisse in Bezug auf die Versickerung und Verdunstung erreichen. Da es sich um eine Verhältnismäßig große Fläche handelt, schafft diese Regenmulde absolut gesehen sehr gute Ergebnisse und entlastet den OB-KS-1 deutlich.

4.8.1.2 Auswertung Wasserstandniveau OB-VM-1

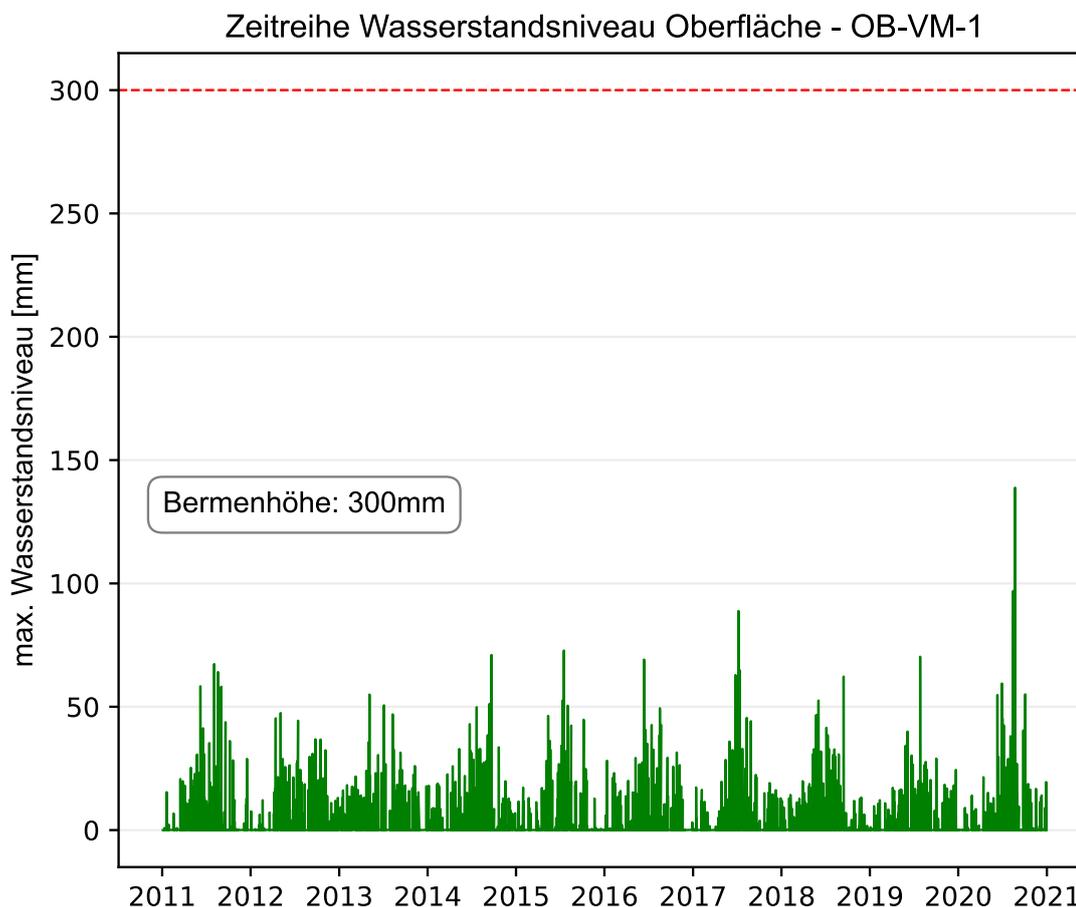


Abbildung 4-36: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet OB-VM-1 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Vegetative Mulde mit 25m²

In der Abbildung 4-36 ist die vegetative Mulde dargestellt. Die Wasserstände steigen bis 90 mm an, wobei es im Jahr 2020 eine Ausnahme, dem Extremereignis (vgl. 3.9), von etwa 140 mm gibt.

In der vegetativen Mulde erfolgt keine direkte Versickerung in den Boden. Stattdessen werden die Pflanzen zunächst einmal benetzt. Nach vollständiger Sättigung des vegetativen Anteils der BGI-Maßnahme, fließt das überschüssige Regenwasser in den Regengarten OB-RM-1 (vgl. 4.8.1.1). Die vegetative Mulde fungiert dabei als Auffangbecken, das überschüssiges Wasser an den Regengarten weiterleitet. Die Grafik zeigt, dass der Wasserstand nie die Kapazitätsgrenze erreicht und in einem Zeitraum von zehn Jahren nie über 300 mm steigt.

Eine zusätzliche Erschließung von Flächen würde zwar zu einem erhöhten Abfluss führen, da gesättigte Pflanzen kein Wasser mehr aufnehmen können und es somit ungehindert abfließt. Dennoch würde das Wasser länger im Gebiet verweilen, da es einen längeren Weg zurücklegen müsste, was zu einem längeren Zeitraum zwischen Regenaufprall und Ansammlung in der Mulde führt. In der Zwischenzeit könnten die Kanalstränge entlastet werden. Letztendlich wird das überschüssige Wasser in den Regengarten geleitet, wo es den Oberflächenabfluss erhöht, aber als Filter wirkt, um verunreinigtes Wasser vom Oedterbach fernzuhalten. Laut Abbildung 4-11 hat OB-VM-1 mit einer Fläche von 25 m² einen Zufluss von 785 m³, davon eine Verdunstung von 34 m³, eine Versickerung von 50 m³ und einen sehr großen Abfluss von 704 m³, der hier aber nicht negativ zu sehen ist.

4.8.1.3 Auswertung Wasserstandniveau OB-VM-2

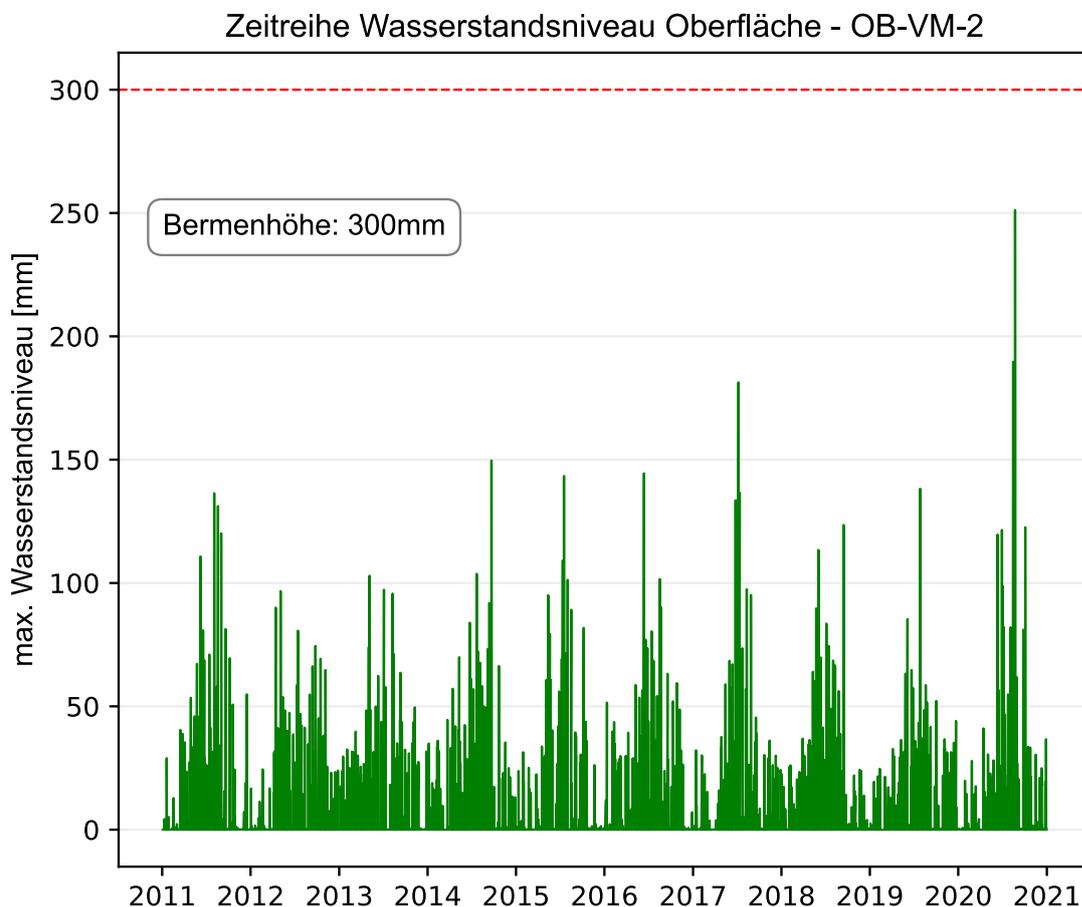


Abbildung 4-37: Darstellung der Wasserstände der Maßnahme im Teileinzugsgebiet OB-VM-2 über eine zehnjährige Zeitreihe in Millimeter (mm) – Vegetative Mulde mit 25m²

Ähnlich wie in der vorherigen Abbildung zeigt diese Abbildung 4-37, dass die Wasserstände in der Regel zwischen 0 mm und 180 mm variieren, wobei es nur eine Ausnahme von etwa 250 mm im Jahr 2020, dem Extremereignis (vgl. 3.9)

gibt. Dies verdeutlicht, dass das OB-VM-2 mehr Wasser zugeflossen bekommt, als das OB-VM-1, da sich das Wasser im Vergleich deutlich mehr anstaut. Trotzdem bleibt die Kapazität unter der Grenze von 300 mm (Bermenhöhe). Das Wasser kann somit gesammelt in den Regengarten OB-RM-1 fließen. Hier kann man sagen, dass die Kapazitätsgrenze noch nicht vollständig erreicht ist und noch Flächen angeschlossen werden können. Auch hier könnte, wie in 4.8.1.1 geschildert, durch die längere Verweildauer des Wassers im Gebiet aufgrund eines längeren Weges zwischen Regenaufprall und Ansammlung in der Mulde, die Entlastung der Kanalstränge ermöglicht werden. Letztendlich wird das überschüssige Wasser in den Regengarten geleitet, wo es den Oberflächenabfluss erhöht, aber als Filter wirkt, um verunreinigtes Wasser vom Oedterbach fernzuhalten.

Laut Abbildung 4-11 weist OB-VM-2 25 m² auf, hat aber einen etwas höheren Zufluss von 1892 m³ als OB-VM-1 und einen Abfluss von 1802 m³, der ebenfalls nicht negativ zu sehen ist.

4.8.2 Kanalabschnitt OB-KS-2

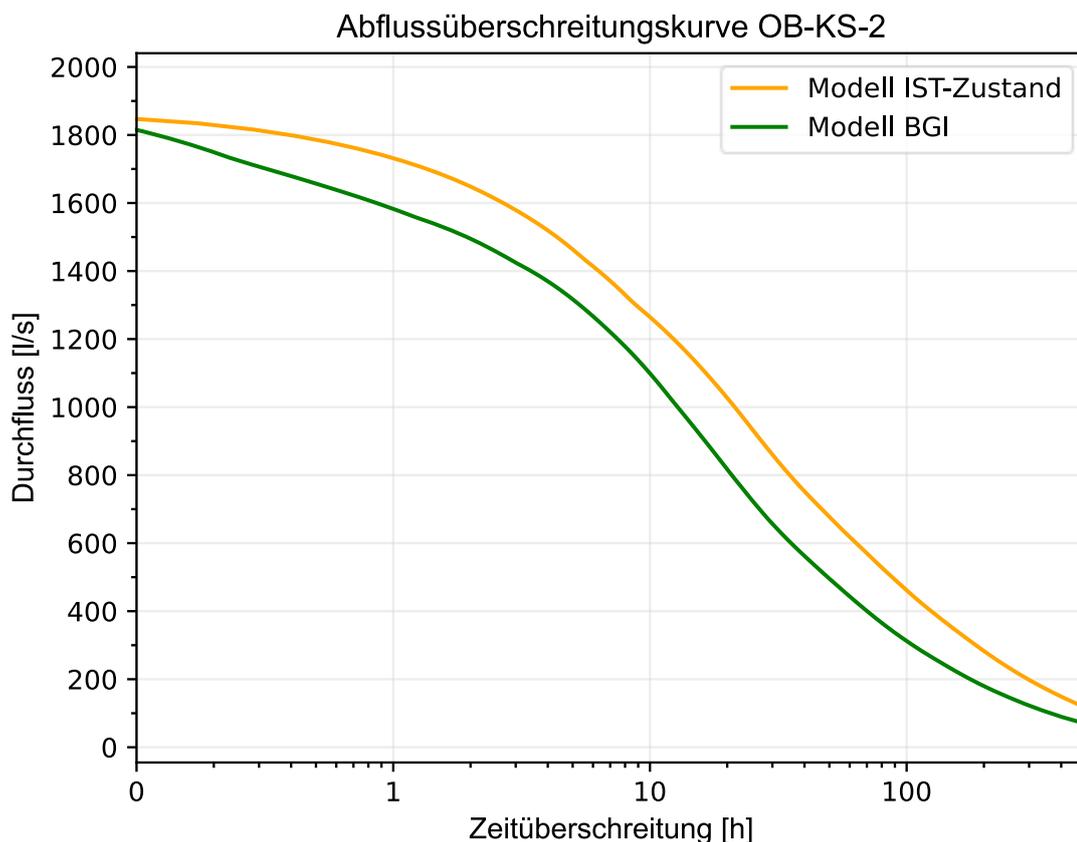


Abbildung 4-38: Vergleich der Abflussüberschreitungslinien des Modells IST-Zustand (orange Linie) und des Modells mit Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur (grüne Linie) - Kanalabschnitt OB-KS-2

Der Kanalstrang OB-KS-2 liegt direkt vor dem Oedterbach und leitet sämtliches Regenwasser aus dem Einzugsgebiet in den Vorfluter. Nachdem alle Kanalstränge im Einzugsgebiet zusammengeführt werden, einschließlich derjenigen aus den Gebieten „Friedhof“, „Kelly“, „Gemeindebau“ und der Teilfläche beim „Oedterbach“, zeigt die Abflussüberschreitungskurve des Kanals OB-KS-2, dass die Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur insgesamt zu einer kontinuierlichen Verbesserung des Abflusses führen. Diese Verbesserung tritt unabhängig von der Größe des hydrologischen Ereignisses und unabhängig von der Umleitung der Erschließung der Kanalschächte auf.

Insgesamt merkt man, dass auch bei kleinen Ereignissen mit Abflussmengen von nur 100 l/s sich deutliche Verbesserungen zeigen. Da dieser Kanal Abflussmengen von bis zu 1800 l/s aufnimmt, machen bereits geringe Verbesserungen eine große Reduzierung des Gesamtabflussvolumens aus. Lediglich bei großen Niederschlagsereignissen, bei dem die Abflussmengen 1600 l/s überschreiten, sieht man eine Näherung der beiden Linien.

5 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen, und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Durch die Implementierung von Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur wurde versucht, die genannten Problematiken, die in dem Kapitel 2 beschrieben sind, zu adressieren und somit die Resilienz urbaner bzw. peri-urbaner Räume gegenüber klimatischen Herausforderungen zu stärken (vgl. 2.2).

Im Rahmen des Projekts "PeriSponge", das sich mit der Evaluierung des wassersensiblen Umbaus der Oedter Straße befasst, wurde ein hydrologisches Modell des IST-Zustandes und ein BGI-Maßnahmen Modell erstellt. Hierfür wurden EPA SWMM und PC-SWMM (vgl. 3.3.1) verwendet. Das BGI-Modell umfasst verschiedene Maßnahmen der blau-grünen Infrastruktur wie versickerungsfähige Parkplätze, vegetative Mulden, Sickermulden und Regengärten (vgl. 2.3.2). Die Kalibrierung und Validierung erfolgte anhand von realen Durchfluss- und Niederschlagsdaten (vgl. 3.4). In den Langzeitsimulationen wurden die Modelle verglichen und die Wirksamkeit der BGI-Maßnahmen bewertet (vgl. 4), insbesondere in Bezug auf ihre Auswirkungen auf den städtischen Wasserhaushalt.

5.2 Schlussfolgerungen

Die Masterarbeit bestätigt das Potenzial blau-grüner Infrastruktur, die einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung von Abflussproblemen im urbanen Raum leisten können und die Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel erhöhen können. Dank der Implementierung blau-grüner Infrastruktur Maßnahmen konnten wesentliche Verbesserungen in der Abflusscharakteristik erzielt werden. Abflussspitzen konnten verringert (vgl. 4.3.4) werden und das Gesamtvolumen an Regenwasser konnte ebenfalls erheblich minimiert werden und führte dazu, dass weniger Wasser in den Vorfluter landet und somit dieser auch wesentlich entlastet wird (vgl. 4.3).

Beim Regengarten (OB-RM-1) ist auf eine gute Kombination zwischen erschlossener Fläche und Versickerung des Niederschlags in den Untergrund zu achten. In diesem Projekt ist der Regengarten mit 247 m² eine große Flächeninanspruchnahme und kann somit bei großzügiger Erschließung sehr viel Wasser aufnehmen und im Anschluss versickern bzw. verdunsten lassen. Ein weiterer positiver Aspekt des Regengartens ist, dass die Regengärten landschaftsgestalterische Elemente sind, die Regenwasser auffangen, speichern und langsam versickern lassen. Dadurch wird neben der Belastungsreduzierung des Abwassersystems auch das Grundwasser auf natürliche Weise wieder aufgefüllt. Für Tiere bieten Regengärten Lebensraum und Nahrung. Sie können eine Vielzahl von Insekten, Vögeln und anderen kleinen Lebewesen anziehen, die von den Pflanzen und der

feuchten Umgebung profitieren. Dies kann zur Biodiversität und dem ökologischen Gleichgewicht beitragen, indem es Lebensraum für verschiedene Tierarten bietet.

Bei den Sickermulden beim Gemeindebau kann man erkennen, dass bei richtiger Erschließung viel Wasser zurückgehalten werden kann und Sickermulden somit das Wasser wirksam versickern und verdunsten lassen können (vgl. Abbildung 4-11).

Wenn die Kapazitätsgrenzen der Sickermulden erreicht sind und zu viele Flächen angeschlossen sind, kann es vorkommen, dass das aufgenommene Wasser über die Bermenoberkante fließt und zurück auf die umliegenden Flächen gelangt. Aufgrund der Tendenz des Wassers, den Weg mit dem geringsten Widerstand zu wählen, erfolgt die Verteilung des Oberflächenwassers nicht gleichmäßig über die umliegenden Flächen. Stattdessen neigt es dazu, direkt zum nächstgelegenen Kanalschacht abzulaufen. Das führt wiederum zu konzentrierteren Abflüssen in den Kanal und kann statt einer Verbesserung auch zu einer Verschlechterung der Abflusscharakteristik führen (vgl. 4.6.1 & 4.7.2).

Das Umleiten von Flächen zu BGI-Maßnahmen kann zu verstärktem Abfluss führen, da weniger Wasser von den Grünflächen aufgenommen wird. Direktes Ableiten von Niederschlagswasser zu den BGI-Maßnahmen könnte das Potenzial der Grünflächen nicht vollständig ausschöpfen und zu einer Überlastung der einzelnen BGI-Maßnahmen führen (vgl. 4.6.1.1, 4.6.1.2 & 4.7.2.1).

Bei den Sickermulden und den angeschlossenen Kanalabschnitten beim Friedhof können kontinuierliche Verbesserungen festgestellt werden. Man könnte die Sickermulden sogar mit größeren Flächen erschließen, da die Kapazitäten bei den FH-SM-4 (vgl. 4.5.1.2), FH-SM-1 (vgl. 4.5.1.7) und FH-SM-3 (vgl. 4.5.1.4) nicht ihr volles Potenzial erreichen. Lediglich das FH-SM-2 (vgl. 4.5.1.6) ist sehr gut erschlossen. Das zusätzliche Erschließen kann auch mit erhöhten wirtschaftlichen Aufwendungen einhergehen, da möglicherweise Straßen und Gehwege umgestaltet werden müssen.

Bei den Sickermulden beim Kelly ist zu sagen, dass die KLY-SM-2 und KLY-SM-1 überlastet sind und zu viele Flächen angeschlossen sind (vgl. 4.6.1.1 & 4.6.1.2). Hier könnten die Aufbauten vergrößert werden, die Flächen vergrößert werden oder weniger Flächen angeschlossen werden, aber auch die Grünflächen wieder mehr genutzt werden, wie es in dem IST-Modell der Fall war.

Die sickerfähigen Parkplätze in der Nähe des Friedhofs, nämlich FH-SfP-3 (vgl. 4.5.1.1), FH-SfP-2 (vgl. 4.5.1.3) und FH-SfP-1 (vgl. 4.5.1.5), die mit den Sickermulden beim Friedhof verbunden sind, zeigen deutliches Potenzial für zusätzliche Erschließung. Allerdings besteht auch die Beobachtung, dass das Wasser teilweise an der Oberfläche abfließt und nicht vollständig versickert. Wie bereits

in 4.5.1.1 beschrieben, wäre es daher sinnvoller, die Durchlässigkeit des obersten Belags durchlässiger zu gestalten. Eine durchlässigere Belagsoberfläche könnte mehr Wasser schneller aufnehmen und den Speicher effektiver nutzen. Dies könnte dazu beitragen, die Belastung der Kanäle weiter zu verringern. Ebenso wäre es möglich, eine Berme von 1-2 cm auszuführen, damit das Wasser länger gehalten wird und so ebenfalls auf dem sickerfähigen Parkplatz gehalten wird. In weiterem Planungsfortschritt sind mehr Informationen bezüglich der Wahl des Belags bekannt, die wiederum mehr Informationen über die Durchlässigkeit geben könnten.

Die vegetativen Mulden der OB-VM-1 (vgl. 4.8.1.2) und OB-VM-2 (vgl. 4.8.1.3) sammeln das Wasser von den umliegenden Flächen, das dann in den Regengarten OB-RM-1 als Oberflächenwasser geleitet wird. Obwohl die vegetativen Mulden das Wasser nicht versickern lassen können, helfen sie dabei, die Belastung der Regenkanäle zu reduzieren. Das gesammelte Regenwasser wird nach Sättigung in den Regengarten OB-RM-1 geleitet, wobei der Wasserstand unter der Kapazitätsgrenze bleibt. Dies trägt dazu bei, Kanalstränge effektiv zu entlasten. Das überschüssige Wasser gelangt in den Regengarten, wo es den Oberflächenabfluss erhöht und gleichzeitig als Filter dient, um verunreinigtes Wasser vom Oedterbach fernzuhalten. Ein weiterer Vorteil dieser Mulden könnte ihre schnelle und kostengünstige Installation sein, da kein aufwendiger Aufbau erforderlich ist. Durch die flexible Gestaltung könnten sie an die spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten des Standorts angepasst werden, was eine individuelle Lösung für die Regenwasserbewirtschaftung ermöglicht. Im Vergleich zu anderen Maßnahmen erfordern vegetative Mulden oft weniger regelmäßige Wartung. Sobald die Pflanzen gut versorgt sind, können sie eigenständig zur Bodenstabilisierung und Regenwasserverarbeitung beitragen und gleichzeitig die Umgebung ästhetisch aufwerten.

Allgemein könnte sinnvoll sein, eine vorhandene Sickermulde zu verlegen und an einem anderen Standort anzulegen, der möglicherweise besser geeignet ist, um beispielsweise die überlasteten Maßnahmen zu entlasten. Eine alternative Möglichkeit wäre es, den Aufbau wirtschaftlich zu optimieren und kleinere Aufbauhöhen zu verwenden. Die dadurch eingesparten Kosten könnten dann in die überlasteten Maßnahmen investiert werden, um ihre Effektivität zu erhöhen, beispielsweise durch Anpassung der Aufbauhöhen. Dieser Ansatz erfordert jedoch eine gründliche Analyse vor dem eigentlichen Umbau, um eine fundierte Entscheidung treffen zu können.

Es ist entscheidend, die relevanten Parameter für BG-Infrastrukturmaßnahmen sorgfältig zu analysieren, da sie das Endergebnis maßgeblich beeinflussen können. Zum Beispiel kann die Wahl der Bodenbelagsdurchlässigkeit bei sickerfähi-

gen Parkplätzen erhebliche Unterschiede ausmachen (vgl. 4.5.1.1). Eine maßgeschneiderte Gesamtstrategie, die die spezifischen Bedürfnisse jedes Einzugsgebiets berücksichtigt, ist entscheidend für eine maximale Effektivität.

5.3 Ausblick

Zum Zeitpunkt der Masterarbeit wurden Parameter, Standorte, Erschließungen und BGI-Maßnahmengrößen festgelegt und vorgegeben, aber auch auf Basis von Literaturrecherche angenommen. Es gab jedoch im Verlauf der Masterarbeit parallel Änderungen in den Plänen, die nicht in die Masterarbeit integriert werden konnten, da sie den zeitlichen Rahmen überschreiten würden. Es ist jedoch äußerst wichtig und ratsam, die tatsächlich umgesetzten Maßnahmen in ein aktualisiertes Modell zu integrieren, um ihre Wirksamkeit zu überprüfen und sicherzustellen, dass die Ziele der Regenwasserbewirtschaftung erreicht werden. Durch Nachmessungen und Überwachungen nach den Umbaumaßnahmen kann die Genauigkeit des Modells bewertet und neues Wissen gewonnen werden. Dies ist von entscheidender Bedeutung, um sicherzustellen, dass die Maßnahmen effektiv sind und langfristig zur nachhaltigen Regenwasserbewirtschaftung beitragen.

Ein vielversprechender Ansatz für zukünftige Forschung und Praxis könnte darin bestehen, neue Methoden zu nutzen, um die Effizienz und Wirksamkeit von blau-grünen Infrastrukturen weiter zu verbessern. Beispielsweise könnten befestigte verkehrsberuhigte Flächen wie Gehwege entlang der Oedter Straße und Oswaldigasse, sowie Parkplätze beim Friedhof, der Firma Kelly und beim Gemeindebau, durch unmittelbare Aufnahme des aufprallenden Regens durch oberflächennahe Kanäle als Retentionskörper genutzt werden. Diese oberflächennahen Kanäle entlasten die Punktentwässerungssysteme (vgl. 3.4.1), wie es in diesem EZG der Fall ist, und können durch ihre Retentionsfähigkeit weitere Ableitungs- bzw. Versickerungsmaßnahmen unterstützen. Hierzu findet man beispielsweise das Produkt „Climate Tile“, vertreten in Österreich durch die Kirchdorfer Fertigteilverteilung GmbH (Kirchdorfer Gruppe, 2024), welche dieser Idee der Flächenentwässerung nachgeht. Die Klimafliese ist eine innovative Lösung für urbane und peri-urbane Räume. Durch die großflächige Sammlung von Regenwasser und dessen Wiedereinführung in den natürlichen Wasserkreislauf trägt sie entscheidend zur Förderung der nachhaltigen Regenwasserbewirtschaftung bei. Durch Pilotprojekte in Kopenhagen wird ihre Wirksamkeit demonstriert und das Potenzial für eine mögliche weltweite Anwendung aufgezeigt (CLIMATE TILE, 2024).

Literaturverzeichnis

- bgmr Landschaftsarchitekten (2023) Netz der urbanen grünen Infrastruktur I Biodiversität = Lebensqualität. bgmr Landschaftsarchitekten. [online] <https://www.bgmr.de/de/projekte/UrbaneGrueneInfrastruktur> (Zugegriffen 20. November 2023).
- BlueGreenStreets (2022) *BlueGreenStreets Toolbox – Teil B. Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere*, Hamburg.
- Bundesministerium (2023) Der hydrographische Datenverbund. eHYD auch als WebApp für mobile Geräte. [online] <https://info.bml.gv.at/themen/wasser/wasser-oesterreich/hydrographie/der-weg-zu-den-daten/2014ehydall-info.html> (Zugegriffen 23. November 2023).
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2021) Graue Infrastruktur. [online] <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/518193/> (Zugegriffen 27. April 2024).
- Büsch Technology GmbH (2023) Rückstauklappe. [online] <https://www.buesch.com/de/produkte/klappen/rueckstauklappe/> (Zugegriffen 22. November 2023).
- CLIMATE TILE (2024) TREDJE NATUR. [online] <https://www.tredjenatur.dk/en/portfolio/climatetile/> (Zugegriffen 13. Mai 2024).
- Climateways (2023) Konzept grüne Infrastruktur. [online] <https://climateways.eu/konzept-fuer-gruene-infrastruktur/> (Zugegriffen 20. November 2023).
- Deletic A., Dotto C. B. S., McCarthy D. T., Kleidorfer M., Freni G., Mannina G., Uhl M., Henrichs M., Fletcher T. D., Rauch W., Bertrand-Krajewski J. L., & Tait S. (2012) Assessing uncertainties in urban drainage models. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **42–44**, 3–10.
- ErWiN (2022) Flächenversiegelung: Was bedeutet das für die Umwelt und welche Alternativen gibt es? ErWiN. [online] https://erwin.employeesforfuture.org/FI%C3%A4chenversiegelung:_Was_bedeutet_das_f%C3%BCr_die_Umwelt_und_welche_Alternativen_gibt_es%3F (Zugegriffen 22. Oktober 2023).
- Fuchsberger J., Kirchengast G., Bichler C., Leuprecht A., & Kabas T. (2023) WegenerNet climate station network Level 2 data: version 8.0 (2007-2022). [online] <https://wegenernet.org/portal/v8.0/2023/2> (Zugegriffen 23. November 2023).
- Haag L. (2024) Oberflächenabfluss, Versickerung und Gesamtabfluss aus Niederschlägen 2017. *Umweltatlas Berlin*. [online] <https://www.berlin.de/umweltatlas/wasser/wasserhaushalt/2017/einleitung/> (Zugegriffen 22. Oktober 2023).

- Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau (2024) [online] <https://www.tugraz.at/institute/sww/home> (Zugegriffen 18. März 2024).
- James W., Rossman L. A., & James W. R. C. (2010) *User's guide to SWMM 5*, CHI, Guelph, Ont. [online] <https://www.chiwater.com/Files/UsersGuide-ToSWMM5Edn13.pdf>.
- Kirchdorfer Gruppe (2024) Kirchdorfer Gruppe | Cement | Construction Minerals | Concrete Solutions | Road & Traffic Group. Kirchdorfer Gruppe | Cement | Construction Minerals | Concrete Solutions | Road & Traffic. [online] <https://www.kirchdorfer.at/> (Zugegriffen 13. Mai 2024).
- McCuen R. H., Johnson P. A., Ragan R. M., National Highway Institute (U.S.), & United States. Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology (2002) *Highway Hydrology: Hydraulic Design Series Number 2, Second Edition*, [online] <https://rosap.nhl.bts.gov/view/dot/44354> (Zugegriffen 19. März 2024).
- OEWAV (2009) ÖWAV-Regelblatt 11 - Richtlinien für die abwassertechnische Berechnung und Dimensionierung von Abwasserkanälen.
- PCSWMM (2023) [online] <https://www.pcswmm.com/> (Zugegriffen 13. November 2023).
- PCSWMM Support (2023a) Climate file. [online] <https://support.chiwater.com/77885/climate-file> (Zugegriffen 4. Februar 2024).
- PCSWMM Support (2024a) Differences between values in the graph or profile vs. those in the status report or result attributes. [online] <https://support.chiwater.com/77633/differences-between-values-in-the-graph-or-profile-vs-those-in-the-status-report-or-result-attribute> (Zugegriffen 10. Mai 2024).
- PCSWMM Support (2024b) Error Analysis. [online] <https://support.chiwater.com/79652/error-functions> (Zugegriffen 1. Mai 2024).
- PCSWMM Support (2023b) LID control editor. [online] <https://support.chiwater.com/77680/lid-control-editor> (Zugegriffen 19. März 2024).
- PCSWMM Support (2024c) LID controls. [online] <https://support.chiwater.com/77701/lid-controls> (Zugegriffen 1. April 2024).
- PCSWMM Support (2023c) SRTC. [online] <https://support.chiwater.com/78922/srtc> (Zugegriffen 27. November 2023).
- PCSWMM Support (2023d) Welcome to PCSWMM Support. [online] <https://support.chiwater.com/> (Zugegriffen 15. November 2023).
- Puttfarcken L. (2023) Ergebnisse des Weltklimarats. Deutsches Klima Konsortium. [online] <https://klimasimulationen.de/weltklimarat/> (Zugegriffen 31. Oktober 2023).

Literaturverzeichnis

- QGIS (2024) QGIS - Ein freies Open-Source-Geographisches-Informationssystem. Willkommen beim QGIS Projekt! [online] <https://www.qgis.org/de/site/> (Zugegriffen 22. März 2024).
- Rawls W. J., Brakensiek D. L., & Miller N. (1983) Green-ampt Infiltration Parameters from Soils Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, **109**(1), 62–70.
- Rieke H., Rolf W., Pauleit S., Born D., Bartz R., Kowarik I., Lindschulte K., Becker C. W., & Schröder A. (2017) Urbane grüne Infrastruktur - Grundlage für attraktive und zukunftsfähige Städte. [online] https://www.bgmr.de/system/publications/files/000/000/012/original/UGI_Broschuere.pdf?1517420727.
- Rossmann L. A. (2016) Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality. [online] <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100P2NY.PDF?Dockey=P100P2NY.PDF>.
- Rossmann L. A. (2015) Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1 - manual. [online] https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=310032 (Zugegriffen 23. März 2024).
- Schatzl R. (2024) Hochwasserberichte. Wasserwirtschaft - Landesregierung Steiermark. [online] <https://www.wasserwirtschaft.steiermark.at/cms/ziel/4652050/DE/> (Zugegriffen 5. Mai 2024).
- Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin (2018) *Leistungsfähigkeit von Praxiserproben Formen der dezentralen und zentralen Regenwasserbewirtschaftung im urbanen Kontext*, Berlin. [online] <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/wasser-und-geologie/regenwasser/regenwasserbewirtschaftung/> (Zugegriffen 24. April 2024).
- Sieker (2024a) Abflussverschärfung. Sieker. [online] <https://www.sieker.de/fachinformationen/umgang-mit-regenwasser/probleme-der-regenentwaesserung/article/abflussverschaeerfung-81.html> (Zugegriffen 24. April 2024).
- Sieker (2024b) Stoffliche Belastungen. Sieker. [online] <https://www.sieker.de/fachinformationen/umgang-mit-regenwasser/probleme-der-regenentwaesserung/article/stoffliche-belastungen-78.html> (Zugegriffen 24. April 2024).
- Sieker Prof. Dr.-Ing. H. & Sieker Prof. Dr.-Ing. F. (2024) Die Regenwasserexperten. Sieker. [online] <https://www.sieker.de/fachinformationen/umgang-mit-regenwasser/probleme-der-regenentwaesserung/article/hydraulischer-stress-79.html> (Zugegriffen 24. April 2024).
- Time and Date AS (2023) Wetterrückblick für Feldbach, Steiermark, Österreich - Juni 2023. [online] <https://www.timeanddate.de/wetter/oesterreich/feldbach/rueckblick?month=6&year=2023> (Zugegriffen 23. November 2023).

- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Muschalla D., DI Rosa Sulzbacher M., DDI Leimgruber J., DI Maier R., Univ.-Prof. DI Dr.nat.techn. Ertl T., DI Dr. nat. techn. Neunteufel R., DI Kretschmer F., DI Dr. Kleidorfer M., & DI Tscheikner-Gratl F. (2015) Auf effizientem Wege von den Daten zum Modell (DATMOD) - Sanierungs- und Anpassungsplanung von kleinen und mittleren Kanalnetzen. [online] https://www.umweltfoerderung.at/fileadmin/user_upload/umweltfoerderung/betriebe/Wasser_Betriebe/Studien_Wasserwirtschaft/DATMOD_Endbericht_160217.pdf.
- US EPA O. (2023) Storm Water Management Model (SWMM). [online] <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (Zugegriffen 10. Mai 2023).
- Yang B., Zhang T., Li J., Feng P., & Miao Y. (2023) Optimal designs of LID based on LID experiments and SWMM for a small-scale community in Tianjin, north China. *Journal of Environmental Management*, **334**, 117442.