GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

HOCHSCHULE RUHR WEST
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Hochschule Bochum
Bochum University of Applied Sciences

Abschlussbericht zum BMBF-Verbundforschungsprojekt

Boden-Rohr-System als innovatives Element der klimaangepassten Stadtentwässerung

Akronym: BoRSiS

Förderkennzeichen:

13FH002KA0

Laufzeit des Vorhabens:

01.10.2021 – 30.09.2024 (kostenneutrale Verlängerung bis 31.12.2024)

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Markus Quirmbach
Hochschule Ruhr West
Duisburger Straße 100
45479 Mülheim an der Ruhr

Telefon: 0208/88254-463
Email: markus.quirmbach@hs-ruhrwest.de

Bearbeiter:

Prof. Dr. Markus Quirmbach, Henrike Walther, Saphira Schnaut
Prof. Dr. René Schäfer, Recep Molla Hasan,
Prof. Dr. Mark Oelmann, Marie Moritz
Prof. Dr. Christoph Mudersbach, Felix Simon

Fördermittelgeber:	**Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)** Förderung im Rahmen der Richtlinie „Forschung an Fachhochschulen in Kooperation mit Unternehmen (FH-Kooperativ)“
Betreuer des Projektes:	**VDI Technologiezentrum** Jana Marquardt VDI-Platz 1 40468 Düsseldorf
Projektpartner:	**Hochschule Ruhr West** Prof. Dr. Markus Quirmbach; Lehrgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Hydrologie und Wasserbau Prof. Dr. René Schäfer, Lehrgebiet Geotechnik Prof. Dr. Mark Oelmann, Lehrgebiet Infrastruktur und Netze **Hochschule Bochum** Prof. Dr. Christoph Mudersbach, Lehrgebiet Wasserbau und Hydromechanik **Am Forschungsvorhaben beteiligte Unternehmen** Christoph Bennerscheidt, European Association for Ductile Iron Pipe Systems EADIPS® / Fachgemeinschaft Guss-Rohrsysteme (FGR®) e. V. Dirk Jan Boudeling, Rockflow – Rockwool Rainwater Systems **Unterauftragnehmer** Dr. Markus Streckenbach, Sachverständigenbüro für urbane Vegetation **Assoziierte Projektpartner** Andreas Hoffmann, Stadt Detmold Prof. Dr. André Niemann, Universität Duisburg-Essen
Verbundkoordinator:	Prof. Dr. Markus Quirmbach Hochschule Ruhr West Lehr und Forschungsgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Hydrologie und Wasserbau Duisburger Straße 100, 45479 Mülheim an der Ruhr Telefon: 0208/88254-463 Email: markus.quirmbach@hs-ruhrwest.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Abbildungsverzeichnis III

Tabellenverzeichnis VI

1 Einführung und Projektziele 1

1.1 Gesamtziele des Verbundforschungsvorhabens BoRSiS 1

1.2 Zusammenarbeit im Forschungsverbund und Bezug zu den förderpolitischen Zielen 2

1.3 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes 3

2 Vorstellung der eingesetzten Produkte der Industriepartner 5

2.1 Gussrohre 5

2.2 Steinwolle (Rockflow®) 8

3 Ganzheitliches Starkregen- und Klimaanpassungskonzept (AP 1) 10

3.1 Entwicklung einer Handlungsempfehlung zum ganzheitlichen Starkregen- und Klimaanpassungskonzept (TAP 1.1) 10

3.2 Analyse von Klimaänderungssignalen (TAP 1.2) 13

3.2.1 Auswertung der Trockenperioden 13

3.2.2 Auswertung der Niederschläge vor den Trockenperioden 15

3.2.3 Auswertung von Temperaturdaten 16

3.3 Bewertung der Maßnahme im Gesamtkontext (TAP 1.3) 18

4 Wasserbilanzierung / Regenwassermanagement (AP 2) 22

4.1 Regenwassermanagement 22

4.2 Qualitative Bewertung von stofflichen Belastungen (TAP 2.2) 23

4.3 Grundlagenermittlung und Vorplanung (TAP 2.3) 24

5 Wasserbauliche Untersuchungen (AP 3) 26

5.1 Aufbau eines Demonstrators für Grundsatzuntersuchungen an einem Rigolensystem (TAP 3.1) 27

5.1.1 Vorversuche 30

5.1.2 Messeinrichtungen 31

5.2 Konzept für Versuchsdurchführungen (TAP 3.2 & TAP 3.3) 32

5.3 Analyse und Bewertung der Versuche (TAP 3.2 & TAP 3.3) 32
5.3.1 Kleinversuche 32
5.3.2 Großversuch 35
5.4 Zusammenfassung 37
6 Geotechnische Untersuchungen (AP 4) 39
6.1 Bodenmechanische Laborversuche (TAP 4.1) 39
6.2 Erosionsversuche (TAP 4.2) 41
6.3 In-situ Feldversuche (TAP 4.3) 42
6.4 Numerische Strömungssimulationen (TAP 4.4) 47
7 Ökonomische Fragestellungen (AP 5) 57
7.1 Analyse der institutionellen Rahmenbedingungen (TAP 5.3) 57
7.1.1 Institutionen und Akteure 58
7.1.2 Sichtung und Analyse der Institutionen (rechtliche und technische Rahmenbedingungen) 59
7.1.3 Sichtung und Analyse der Organisationen/ Akteure 62
7.1.4 Förderliche und hemmende Faktoren 63
7.2 Kosten-Nutzen-Analysen (TAP 5.1) 66
7.2.1 Grundsätzliche Methodik einer Kosten-Nutzen-Analyse 66
7.2.2 Anwendung der Kosten-Nutzen-Analyse auf das Boden-Rohr-System 67
7.3 Finanzierung (TAP 5.2) 79
7.3.1 Finanzierung in Abhängigkeit der Nutzen 79
7.3.2 Finanzierung nach Art der Anlage 81
7.3.3 Kostenaufteilung in den Pilotkommunen 82
7.3.4 Fördermittel 83
8 Einflüsse des Boden-Rohr-Systems auf die Normung 84
9 Literaturverzeichnis 85
Anlage: Handlungsempfehlung für die Umsetzung des Boden-Rohr-Systems
Anlage: Rechenvorschrift für die Dimensionierung des Boden-Rohr-Systems

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: In Betrieb befindliche geflanschte Grauguss-Rohre der Brunnenanlage von Schloss Versailles (ca. 1680) (eigene Aufnahme Bennerscheidt) 6

Abbildung 2-2: Herstellung eines duktilen Gussrohres im Schleuderguss (De-Lavaud) - Verfahren (Rammelsberg, 2016) 6

Abbildung 2-3: Moderne duktile Gussrohre unter extremer Biegebelastung (Rammelsberg, 2016) 6

Abbildung 2-4: Einbau eines duktilen Gussrohres nach EN 598 mit einer Zementmörtel-Umhüllung nach EN 15542 (Quelle noch offen) 7

Abbildung 2-5: Rockflow Steinwollelemente in verschiedenen Bauhöhen 8

Abbildung 2-6: Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus mit Rockflow Steinwolle, mit Wasserzufuhr und Entlüftung mittels gefräster Rohrkanäle in der Steinwolle 9

Abbildung 3-1: Draufsicht auf das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (oberflächennahe Zufuhr des Niederschlagswassers) 11

Abbildung 3-2: Querschnitt B-B durch das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (oberflächennahe Zufuhr des Niederschlagswassers) 11

Abbildung 3-3: Auswertung der Trockenperioden in Leichlingen im Zeitraum 1931 – 2022 14

Abbildung 3-4: Verteilung der Trockenperioden über den Jahresverlauf für Leichlingen im Zeitraum 1931 – 2022 15

Abbildung 3-5: (Trockene) Sommer- und Hitzetage in Leichlingen im Zeitraum 1951 – 2020 16

Abbildung 3-6: Tropennächte in Leichlingen im Zeitraum 1951 – 2020 17

Abbildung 3-7: Frost- und Eistage in Leichlingen im Zeitraum 1951 – 2020 18

Abbildung 4-1: Fest- bzw. Schadstoffeintrag über den Eintragspfad Niederschlagswasser 23

Abbildung 5-1: Seitliche Ansicht des Behälters mit der Zulaufpumpe und Rücklaufkanal (links) und Innenansicht des Versuchsbehälters (rechts)) 28

Abbildung 5-2: Gefüllte Standrohre mit integrierter Drucksonde und Verkabelung zum Datenlogger (links) und die Innenansicht mit eingebauter Estrichsohle und Trichtergefälle zu den verbauten Messrohren (rechts).....28

Abbildung 5-3: Exemplarisch Darstellung des Versuchsaufbaus im 1:1 Demonstrator.....29

Abbildung 5-4: IBC-Versuchsbehälter für Vorversuche 30

Abbildung 5-5: Aufbau der beiden Kleinversuche zu Beginn der Vorversuche mit zwei unterschiedlichen Geotextilien....31

Abbildung 5-6: Versuchsaufbau ohne Rockflow-Elemente....33

Abbildung 5-7: Vergleich der Speicherwirkung mit Rockflow (oben) und ohne Rockflow (unten)....34

Abbildung 5-8: Einleitung des Wassers in die Rockflow-Elemente am Einlauf mit Rückstau (links) und am Ende der Elemente mit zusätzlichen Drainagerohr (rechts)....35

Abbildung 5-9: Wasserstände des Großversuchs....36

Abbildung 5-10: Starkniederschlagshöhen und -spenden gemäß KOSTRA-DWD-2020 für den Standort Leichlingen (Rasterfeld 137102), Quelle: openko.de (2023)....37

Abbildung 6-1: Sieblinien der untersuchten Korngemische 0/2; 2/4; 16/32 (eigene Darstellung)....40

Abbildung 6-2: Mögliche Suffusionen und Erosionen im verfüllten Leitungsgraben (visaplan GmbH, 2012)....41

Abbildung 6-3: Beispielhafter Aufbau einer befestigten Straße, Quelle: (FGSV, 2012)....42

Abbildung 6-4: Ödometerversuch an einer gesättigten Steinwollprobe (eigene Darstellung)....43

Abbildung 6-5: Aufbau der Probefelder (Sevriens, 2023)....45

Abbildung 6-6: Trendlinie aus den a) statischen und b) dynamischen Lastplattendruckversuchen für das Material WM 2005 (eigene Darstellung)....46

Abbildung 6-7: Trendlinie aus den a) statischen und b) dynamischen Lastplattendruckversuchen für das Material WM 2007 (eigene Darstellung)....46

Abbildung 6-8: Spannungs-Stauchungs-Diagramm eines zyklischen Ödometerversuchs (eigene Darstellung)....48

Abbildung 6-9: Validierung mit hyperelastischen Stoffmodell eines Ödometerversuchs (eigene Darstellung)....50

Abbildung 6-10: Großmodellversuch in Leipzig (Rockwool, 2024)....51

Abbildung 6-11: Fehlerquellen bei der Probeentnahme (Seitenansicht a) Draufsicht b)) (eigene Darstellung)....52

Abbildung 6-12: Vergleich Spannungs-Setzungs-Diagramm für den Erst- und Wiederbelastungsast (eigene Darstellung)....53

Abbildung 6-13: Vergleich des Spannungs-Setzungs-Diagramms für die Stabilisierungsschicht 30 cm Versuch 1 (eigene Darstellung) 53

Abbildung 6-14: Vergleich der Modellierungsergebnisse mit den Versuchsergebnissen (eigene Darstellung).....56

Abbildung 7-1: Querschnitt der Akteursstruktur im Abstimmungsprozess (Quelle: arbeitspaketübergreifende Befragung). 63

Abbildung 7-2: Als förderlich und hemmend empfundene Faktoren 63

Abbildung 7-3: Mögliche Aufteilung der Betriebskosten und Zuständigkeiten.....82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Mittlere Auftretenshäufigkeit der Trockenperioden pro Jahr in den vier Untersuchungsräumen im Zeitraum 1931 – 2022 13

Tabelle 3-2: Mittlere Auftretenshäufigkeit der Trockenperioden pro Jahr in Leichlingen im Zeitraum 1931 – 2022 14

Tabelle 3-3: Auswertung der Niederschlagsmengen vor Trockenperioden in Leichlingen (Köln / Detmold / Mülheim) im Zeitraum1931-2022 16

Tabelle 3-4: Bewertungskriterien der verschiedenen Anpassungsmaßnahmen für die Einordnung in den Kontext der BGI 20

Tabelle 3-5: Auszug aus der Bewertungsmatrix, Bewertung des BRS und einer Baumrigole 20

Tabelle 6-1: Auswertungen der durchgeführten Ödometerversuche an gesättigten und ungesättigten Proben (eigene Darstellung) 44

Tabelle 6-2: Übersicht der Versuche mit dem elektro-pneumatischer Ödometer (eigene Darstellung) 47

Tabelle 6-3: Auswertungstabelle eines Ödometerversuchs (eigene Darstellung) 49

Tabelle 6-4: Auswertungsergebnisse der Ödometerversuche (eigene Darstellung) 50

Tabelle 6-5: Rückrechnung der Steifigkeiten des HKS 0/45 (eigene Darstellung) 54

Tabelle 6-6: Richtwerte für die Zuordnung der Verformungsmodul E_{v2} zum Verdichtungsgrad D_{Pr} (Strauß, 2018) 55

Tabelle 7-1: Relevante Gesetzesvorgaben für das BRS 59

Tabelle 7-2: Relevante technische Rahmenbedingungen für das BRS 61

Tabelle 7-3: Beispiel für eine Kosten-Nutzen-Analyse 67

Tabelle 7-4: Ermittlung von Mengen und Kostenspannen einzelner Positionen als Grundlage der Kostenbestimmung 68

Tabelle 7-5: Kostenvergleich zwischen herkömmlichem System und BRS 69

Tabelle 7-6: Mehr-/Minderkosten eines BRS im Vergleich zu einem herkömmlichen System 70

Tabelle 7-7: Analyse des Nutzens: (A) Vergrößerter Speicherraum für Niederschlagswasser 72

Tabelle 7-8: Analyse des Nutzens: (B) Verbesserte Bedingungen für Stadtbäume 73

Tabelle 7-9: Analyse des Nutzens: (C) Verwendung von duktilen Gussrohren 75

Tabelle 7-10: Berechnung der Parameter der Kosten-Nutzen-Analyse 77

Tabelle 7-11: Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse (Zeitraum = 71 Jahre) 77

Tabelle 7-12: Betrachtung unterschiedlicher Szenarien (Zeitraum = 71 Jahre).....78

Tabelle 7-13: Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse (Zeitraum = 100 Jahre) 78

Tabelle 7-14: Betrachtung unterschiedlicher Szenarien (Zeitraum = 100 Jahre).....79

1 Einführung und Projektziele

Der vorliegende Schlussbericht stellt eine ausführliche Darstellung der Arbeiten an der Hochschule Ruhr West (HRW) dar, die am Institut Bauingenieurwesen in den Lehrgebieten Siedlungswasserwirtschaft, Hydrologie und Wasserbau (WW) und Geotechnik (Geo) sowie am Wirtschaftsinstitut im Lehrgebiet Infrastruktur und Netze (IN) im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens BoRSiS – Boden-Rohr-System als innovatives Element der klimaangepassten Stadtentwässerung erbracht wurden. Es werden, nach Arbeitspaketen geordnet, die wesentlichen Arbeitsschritte sowie die daraus resultierenden Ergebnisse dargestellt. Zur Vollständigkeit und zum besseren Verständnis des Gesamtprojektes wurde der ansonsten auch separat vorliegende Schlussbericht der Hochschule Bochum (Lehrgebiet Wasserbau und Hydromechanik, HS Bo) im Kapitel 5 dieses Abschlussberichtes integriert.

Ergänzend zum Schlussbericht werden als Anhänge eine **Handlungsempfehlung** sowie eine **Dimensionierungsvorschrift** beigefügt. Dort ausführlich beschriebene Details werden im Schlussbericht nur kurz aufgegriffen, und es wird auf entsprechende Kapitel der Handlungsempfehlung bzw. Dimensionierungsvorschrift verwiesen.

1.1 Gesamtziele des Verbundforschungsvorhabens BoRSiS

Mit dem in BoRSiS entwickelten Boden-Rohr-System (BRS) wurde eine innovative Lösung für die Anpassung von Städten an den Klimawandel im Sinne der Blau-Grünen Infrastrukturen entwickelt. Im Wesentlichen wurden dabei die nachfolgenden beiden Ziele verfolgt.

1. Schaffung von ausreichendem Speicherraum für Niederschlagswasser bei Starkregen, ohne dabei zusätzlichen Platzbedarf an der Oberfläche zu beanspruchen.
2. Nutzung der Leitungszone als erweiterter und die Baumstandorte verbindender Wurzelraum, um eine nachhaltige Lösung zur Verbesserung der Baumvitalität zu generieren.

Diese Ziele konnten erreicht werden, weil durch das BRS Baumstandorte mit existierenden Leitungsgräben und Regenwasser-Speicherelementen in einem System miteinander verbunden werden, sodass Wasser aus (Stark-) Regenereignissen den Wurzeln der Bäume zeitverzögert zur Verfügung gestellt werden kann. Zur Erreichung dieses Zieles wurden die nachfolgenden Arbeitspakete bearbeitet:

- AP 1: Ganzheitliches Starkregen- und Klimaanpassungskonzept (WW)
- AP 2: Wasserbilanzierung / Regenwassermanagement (WW)
- AP 3: Wasserbauliche Untersuchungen (HS Bo)
- AP 4: Geotechnische Untersuchungen (Geo)
- AP 5: Ökonomische Fragestellungen (IN)

1.2 Zusammenarbeit im Forschungsverbund und Bezug zu den förderpolitischen Zielen

Die Projektleitung des Verbundforschungsvorhabens wurde durch die Hochschule Ruhr West (Prof. Dr. Markus Quirmbach) wahrgenommen. An den zuvor genannten Arbeitspaketen waren die nachfolgenden Forschungspartner beteiligt:

- **Hochschule Ruhr West (WW, Geo und IN)**
  Entwicklung einer Handlungsempfehlung und Dimensionierungsvorschrift zum BRS, Analyse von Klimaänderungssignalen, Bewertung der Maßnahme im Gesamtkontext, hauptverantwortliche Begleitung der Pilotprojekte, geotechnische Untersuchungen zur Tragfähigkeit des BRS im Straßenraum, Betrachtung ökonomischer Fragestellungen zum Kosten-Nutzen-Verhältnis, zur Finanzierung sowie zu institutionellen Rahmenbedingungen
- **Hochschule Bochum**
  Wasserbauliche Untersuchungen in einem Großversuchsstand zum BRS sowie in Kleinversuchsständen zu Voruntersuchungen zum BRS
- **European Association for Ductile Iron Pipe Systems (EADIPS®) / Fachgemeinschaft Gussrohrsysteme (FGR®) e.V. (Industriepartner)**
  Bereitstellung von Expertenwissen zu Gussrohren und Wurzelräumen, Initiator des Projektes, fachliche Unterstützung der Pilotprojekte
- **Rockwool Rainwater Systems (Industriepartner)**
  Bereitstellung von Expertenwissen zu den Steinwoll-Speicherelementen, fachliche Unterstützung der Pilotprojekte
- **Sachverständigenbüro für urbane Vegetation (Unterauftragnehmer)**
  Fachliche Unterstützung bei baumökologischen Fragestellungen

Darüber hinaus haben folgende Praxispartner das Projekt durch ihre Teilnahme an Verbundtreffen und / oder die aktive Beteiligung durch Pilotprojekte unterstützt:

- Stadt Detmold
- Stadtentwässerungsbetriebe Köln
- Stadt Leichlingen
- Wuppertaler Stadtwerke
- Stadt Solingen
- Stadt Bochum
- Emschergenossenschaft
- Stadtentwässerungsbetrieb Düsseldorf

Zudem werden Ergebnisse der AP 1 und 2 in eine kooperative Promotion einfließen, die von Prof. Dr. André Niemann (Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Duisburg-Essen) während der Projektlaufzeit betreut wurde und auch noch darüber hinaus betreut wird.

Das Projekt BoRSiS wurde im Zeitraum 2021-2024 im Rahmen der Förderrichtlinie „Forschung an Fachhochschulen in Kooperation mit Unternehmen (FH-Kooperativ)“ des

Programms „Forschung an Fachhochschulen“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Ziel dieser Förderrichtlinie ist eine auf Dauer angelegte Forschungskooperation zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft. Dies wird durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit an zwei praxisorientierten Fachhochschulen, die Einbindung von zwei Industriepartnern mit erheblicher finanzieller und personeller Beteiligung, der Umsetzung in mehreren Pilotprojekten bei Praxispartnern sowie der kooperativen Promotion umgesetzt.

1.3 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes

In der dreijährigen Laufzeit und im unmittelbaren Anschluss wurden insgesamt rund 30 Beiträge (siehe nachfolgende Auflistung) zum Projekt BoRSiS auf unterschiedlichem Niveau veröffentlicht, an denen überwiegend mindestens eine Person der HRW als Autor beteiligt war.

- 1 internationale Publikation im peer reviewed Verfahren
- 2 Internationale Publikationen ohne peer reviewed Verfahren
- 6 Nationale Publikationen ohne peer reviewed Verfahren
- 7 (Presse-) Mitteilungen National ohne Peer Reviewed Verfahren
- 5 Vorträge und Poster International
- 13 Vorträge und Poster National

Die nationalen und internationalen Publikationen werden nachfolgend chronologisch aufgeführt:

International peer reviewed

Walther, H.; Bennerscheidt, C.; Boudeling, D. J.; Streckenbach, M.; Simon, F.; Mudersbach, C.; Schnaut, S.; Oelmann, M.; Quirmbach, M. (2025): A new perspective on Blue-Green Infrastructure for climate adaptation in urbanized areas: A Soil-Pipe-System as a multi-functional solution, Land 2025, 14, 1065. https://doi.org/10.3390/land14051065

International ohne peer reviewed Verfahren

Walther, H., Quirmbach, M. (2022): Mit duktilen Gussrohren und Steinwolle zu einem besseren Stadtklima, In Disch, A. & Rieckermann, J. (Eds.), Grün statt grau, Tagungsband der Aqua Urbanica 2022 Konferenz, Glattfelden, Schweiz, 14.-15. November 2022, Eawag, Abteilung für Siedlungswasserwirtschaft, S. 191-195.

Walther, H., Bennerscheidt, C.; Quirmbach, M., Boudeling, D.J., Streckenbach, M. (2024): Mehr Raum für Regenwasser und Baumwurzeln im Straßenraum - Das Boden-Rohr-System zur Anpassung von Städten an den Klimawandel, Tagungsband „Urbanes Niederschlagswassermanagement: Herausforderungen – Möglichkeiten – Grenzen“ der Aqua Urbanica 2024 Konferenz, Graz, Österreich, 23.-24. September 2024, https://doi.org/10.3217/kjsm0-b2n91, S. P26-1 – P26-10

National ohne peer reviewed Verfahren

Quirmbach, M. (2022): Das Boden-Rohr-System gegen Starkregen und Hitzeinseln, Interview mit dem Kammerspiegel der Ingenieurkammer – Bau Nordrhein-Westfalen, S. 5-8

Bennerscheidt, C. (2023): Von der Baumrigole zum Boden-Rohr-System – Erweiterung des Speicher- und Wurzelraums durch Nutzung des Leitungsgrabens, Jahrbuch der Baumpflege 2023, S. 233-239

Walther, H. (2023): Boden-Rohr-System als innovatives Element der klimaangepassten Stadtentwässerung, Tagungsband zum 7. BIH-Treffen, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 14.-15. September 2023, S. 59-63

Walther, H., Bennerscheidt, C. (2024): BoRSiS – Boden-Rohr-System als innovatives Element der klimaangepassten Stadtentwässerung, Tagungsband zum 36. Oldenburger Rohrleitungsforum, 08.-09.02.2024, S. 139-144

Walther, H., Quirmbach, M., Bennerscheidt, C., Streckenbach, M. (2024): Die Schwammstadt im Straßenraum – Das Boden-Rohr-System zur Niederschlagswasser-Speicherung und Bewässerung von Stadtbäumen, 3R, Heft 04-05/2024, S. 66-69, Vulkan Verlag

Quirmbach, M.; Bennerscheidt, C.; Boudeling, D. J.; Molla Hasan, R.; Mudersbach, C.; Oelmann, M.; Schäfer, R.; Schnaut, S.; Simon, F.; Streckenbach, M.; Walther, H. (2025): Regenwassermanagement unter Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzungsansprüche – Ergebnisse aus dem Verbundforschungsvorhaben BoRSiS; zur Veröffentlichung in der KA Korrespondenz Abwasser, Abfall (07/2025) angenommen

2 Vorstellung der eingesetzten Produkte der Industriepartner

Das Verbundforschungsvorhaben BoRSiS wurde im Rahmen der BMBF-Richtlinie „Forschung an Fachhochschulen in Kooperation mit Unternehmen durchgeführt. Die eingesetzten Materialien Gussrohre der European Association for Ductile Iron Pipe Systems (EADIPS® / Fachgemeinschaft Guss-Rohrsysteme (FGR®) e. V. sowie Steinwolle von Rockflow Rainwater Systems stellen einen wesentlichen Bestandteil des entwickelten BRS dar. Beide Produkte werden daher vorab kurz beschrieben, um so ein besseres Verständnis für die nachfolgenden Untersuchungen in den einzelnen Arbeitspaketen zu schaffen.

Für die nachfolgenden Produktbeschreibungen sind die beiden Industriepartner EADIPS / FGR (Christoph Bennerscheidt) und Rockflow (Dave Sevriens) verantwortlich.

2.1 Gussrohre

Die Ressourcen unserer Erde sind sehr begrenzt und wir müssen sorgsam damit umgehen. Das heißt: daraus hergestellte Produkte sollten eine lange Lebensdauer haben und danach nicht nur recycelbar, sondern auch kreislauffähig sein. Kaum ein anderer Werkstoff kann dies von sich behaupten, denn für die Produktion duktiler Guss-Rohrsysteme werden Stahlschrott, Gussbruch oder auch alte Gussrohre (immer wieder) eingeschmolzen, um daraus ohne Qualitätseinbußen wieder hochwertige Rohrsysteme herzustellen. Und genau deshalb ist duktiles Gusseisen der Werkstoff von heute und in Zukunft!

Für Wasserleitungen werden Gussrohre bereits seit dem 14. Jahrhundert eingesetzt (Abbildung 2-1); eine sichere Trinkwasserversorgung mit Leitungen aus Gusseisen (Grauguss) war ein Grundbaustein der industriellen Revolution Mitte des 18. Jahrhunderts. In vielen Großstädten sind heute noch Leitungen aus diesen Anfangsjahren störungsfrei im Betrieb (Rammelsberg, 2016)

Rohre aus duktilem Gusseisen (Gusseisen mit Kugelgrafit, Abbildung 2-2), wurden in den 1950-er eingeführt. Dieser Werkstoff zeichnet sich durch Plastizität und Verformbarkeit aus (Abbildung 2-3). Zum Schutz vor Korrosion entwickelte man entsprechende Auskleidungen und Umhüllungen, mit denen auch heute Nutzungsdauern von mehr als 100 Jahren erreicht werden (Abbildung 2-4).

Abbildung 2-1: In Betrieb befindliche geflanschte Grauguss-Rohre der Brunnenanlage von Schloss Versailles (ca. 1680) (eigene Aufnahme Bennerscheidt)

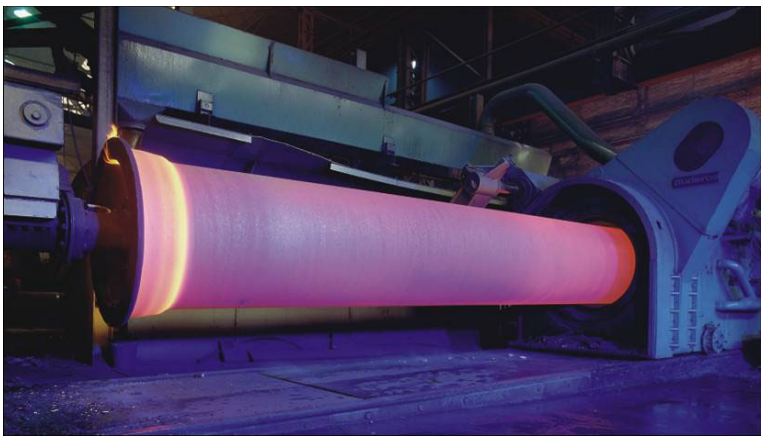


Abbildung 2-2: Herstellung eines duktilen Gussrohres im Schleuderguss (De-Lavaud) - Verfahren (Rammelsberg, 2016)

Abbildung 2-3: Moderne duktile Gussrohre unter extremer Biegebelastung (Rammelsberg, 2016)

Abbildung 2-4: Einbau eines duktilen Gussrohres nach EN 598 mit einer Zementmörtel-Umhüllung nach EN 15542 (Martin und Rink, 2014)

Duktile Guss-Rohrsysteme werden im Europäischen Komitee CEN / TC 203 „Gussrohre, Formstücke und deren Verbindungen“ genormt. Die Mitglieder dieses Komitees haben schon frühzeitig damit begonnen, die Regeln für Schwammstadt-Anwendungen zu entwickeln. Dies geschah auch im Hinblick auf die europaweite Umsetzung der im BoRSiS-Projekt entwickelten Bauweisen mit duktilen Gussrohren. Dazu gehören:

- DIN EN 598: Rohre aus duktilem Gusseisen und zugehörige Komponenten für die Abwasser-Entsorgung – Anforderungen und Prüfverfahren, 2009-10 (Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), 2009)
- EN 15542: Rohre, Formstücke und Zubehör aus duktilem Gusseisen – Zementmörtelumhüllung von Rohren – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche und Englische Fassung prEN 15542, 2022-02 Entwurf (Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), 2022)
- DIN EN 17970: Rohre aus duktilem Gusseisen – Steckmuffen-Verbindung für Rohrsysteme aus duktilem Gusseisen – Widerstandsfähigkeit gegen Wurzeldurchdringung – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 17970, 2024-08 (Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), 2024)

Zudem wurde die Entwicklung eines technischen Regelwerks für Schwammstadt-Anwendungen in das Arbeitsprogramm des CEN/TC 203 beim DIN aufgenommen.

Die **European Association for Ductile Iron Pipe Systems (EADIPS®)** vertritt dabei die Interessen der europäischen Hersteller hochwertiger Rohre, Formstücke und Armaturen aus duktilem Gusseisen für eine gesicherte, dauerhafte und leistungsstarke unterirdische Infrastruktur zur Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung. Als Fachgemeinschaft Guss-Rohrsysteme (FGR®) e. V. wurde der technisch-wissenschaftliche Verband bereits im Jahr 1953 gegründet.

2.2 Steinwolle (Rockflow®)

ROCKWOOL Rainwater Systems ist Teil der Unternehmensgruppe ROCKWOOL. Rockflow® ist ein von ROCKWOOL hergestelltes, aus vollzirkulärer Steinwolle bestehendes Naturprodukt und repräsentiert ein innovatives, unterirdisches Entwässerungssystem zur Speicherung und Versickerung von Regenwasserabflüssen oder zur Speicherung und Einleitung in Oberflächengewässer. Das Produkt Rockflow® besteht aus tragfähigen Steinwollelementen mit einem freiem Wasserspeichervolumen von bis zu 95%. Im Vergleich zu Schotter oder grobem Material mit einem Hohlraumanteil von 30 % bis 40 %, weist Rockflow® somit einen deutlich höheren Hohlraumanteil auf.

Ein Steinwollelement hat die Abmessungen B = 0,15 m, L = 1,2 m und wahlweise Bauhöhen von 1,0 m, 0,5 m oder 0,66 m (Abbildung 2-5). Die relativ geringe Breite B = 0,15 m eines Einzelelements lässt eine flexible Gestaltung der Gesamtbreite, in Abhängigkeit von der Breite des Leitungsgrabens und des geforderten Speichervolumens, zu.

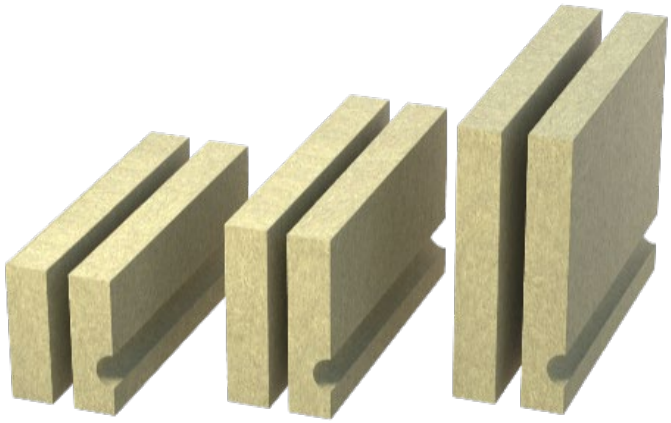


Abbildung 2-5: Rockflow Steinwollelemente in verschiedenen Bauhöhen

Zur Beschickung des Systems nutzt das System die in der Steinwolle vorgeformten Rohrkanäle (Abbildung 2-6). Diese haben die Funktion, das Wasser schnell in das System zu einzuleiten und verteilen. Ein zweiter Kanal sorgt für die Entlüftung des Systems.

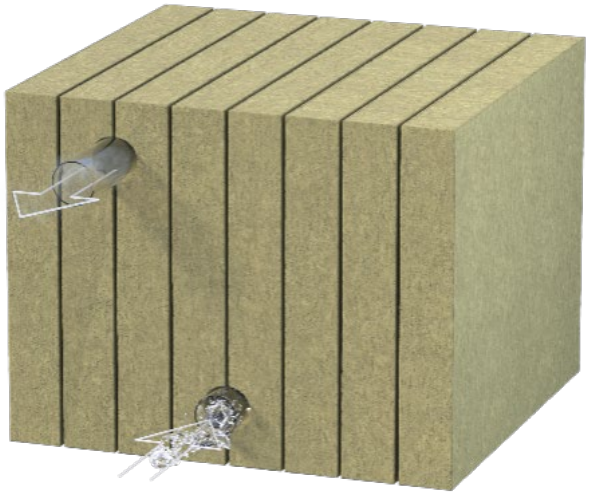


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus mit Rockflow Steinwolle, mit Wasserzufuhr und Entlüftung mittels gefräster Rohrkanäle in der Steinwolle

Eine Anlage wird aus mehreren solcher Steinwollelementen modular aufgebaut, bis das geforderte Speichervolumen realisiert wurde. Die Rockflow-Steinwolle ist formfest und druckbeständig und kann daher unterirdisch unter Straßen, Wegen, Parkplätzen, Gehwegen etc. verlegt werden. Rockflow-Produkte werden bereits in verschiedenen Konfigurationen an mehr als 400 Standorten zur Speicherung und Ableitung von Regenwasser eingesetzt.

Rockflow-Systeme zeichnen sich durch ihre hohe Lebensdauer und einfache Wartung aus (weitere Details sind der Handlungsempfehlung zu entnehmen). Dank der Flexibilität in Design und im Einbau können maßgeschneiderte Lösungen für lokales Regenwasser-management auch unter anspruchsvollsten Bedingungen umgesetzt werden.

3 Ganzheitliches Starkregen- und Klimaanpassungskonzept (AP 1)

Die Ziele von AP 1 bestanden zum einen darin, die Ergebnisse aus dem Gesamtprojekt zu bündeln und sowohl in eine Systemskizze als auch in eine Handlungsempfehlung für Anwender einfließen zu lassen. Zum anderen ging es um die Generierung von Grundlagendaten sowie die Einordnung des BRS in den Gesamtkontext der BGI.

Die folgenden Unterkapitel beschreiben die wesentlichen Bearbeitungsschritte und Ergebnisse jedes Teilarbeitspaketes:

- TAP 1.1: Entwicklung einer Handlungsempfehlung zum ganzheitlichen Starkregen- und Klimaanpassungskonzept
- TAP 1.2: Analyse von Klimaänderungssignalen
- TAP 1.3: Bewertung der Maßnahme im Gesamtkontext

Die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes sowie die nachfolgende Ergebnisdarstellung erfolgte federführend am Lehrgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Hydrologie und Wasserbau (Prof. Dr. Markus Quirmbach) der Hochschule Ruhr West.

3.1 Entwicklung einer Handlungsempfehlung zum ganzheitlichen Starkregen- und Klimaanpassungskonzept (TAP 1.1)

Die im Projekt entwickelte und diesem Schlussbericht angehängte Handlungsempfehlung enthält umfangreiche Hinweise zur Ausführung des BRS. Auf eine ausführliche Darstellung wird daher an dieser Stelle verzichtet. Es werden nachfolgend lediglich das Inhaltsverzeichnis der Handlungsempfehlung sowie zwei Systemskizzen gezeigt, die ein generelles Verständnis der in diesem Schlussbericht dargestellten Ergebnisse ermöglichen sollen.

Die nachfolgende Variante des BRS stellt eine Vorzugsvariante dar, die individuell je nach den örtlichen Randbedingungen modifiziert werden kann. Da das Projektende von BoRSiS und die Veröffentlichung des neuen DWA-A 138-1 (DWA, 2024b) zur Niederschlagswasserversickerung fast zeitgleich, Ende 2024, stattgefunden haben, bestand bei der Erstellung des Abschlussberichtes eine Unsicherheit, wie in Zukunft mit der Reinigung bzw. Vorbehandlung von Dachwasser (Flächengruppe D) in der praktischen Umsetzung umgegangen wird. Abbildung 3-1 (Draufsicht) und Abbildung 3-2 (Querschnitt im Schnitt B-B) zeigen daher zunächst exemplarisch, anhand der idealen Vorstellung des Konsortiums, wie die Umsetzung des BRS aussehen kann, wenn das Niederschlagswasser der angeschlossenen Dächer oberflächennah dem Baumstandort zugeführt wird. In dieser Variante wird eine Reinigungsleistung des eingesetzten Substrates am Baumstandort angenommen.

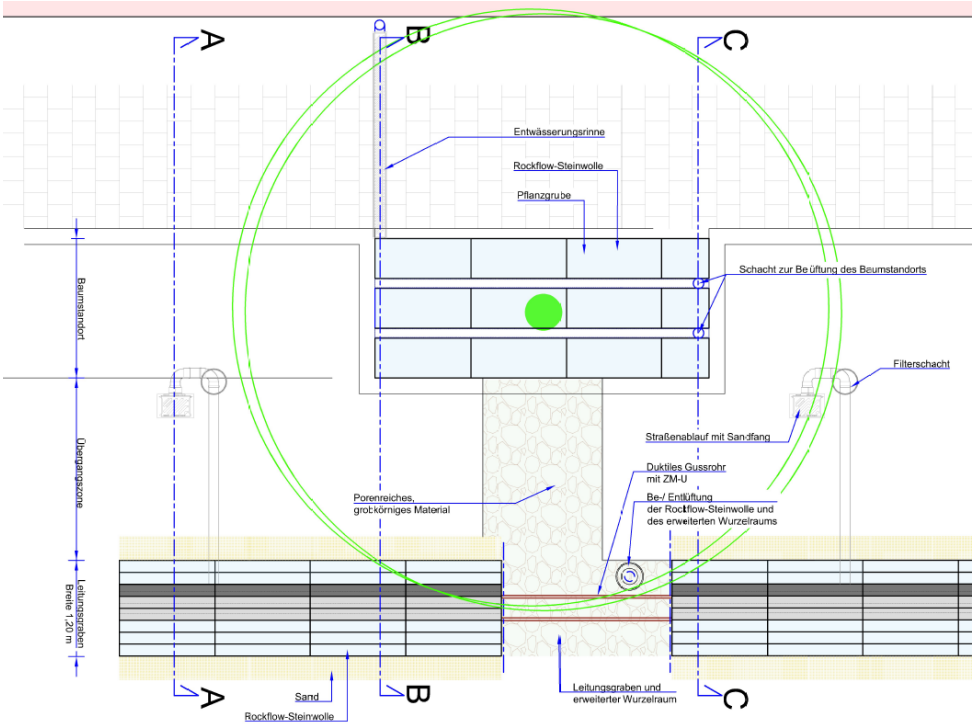


Abbildung 3-1: Draufsicht auf das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (oberflächennahe Zufuhr des Niederschlagswassers)

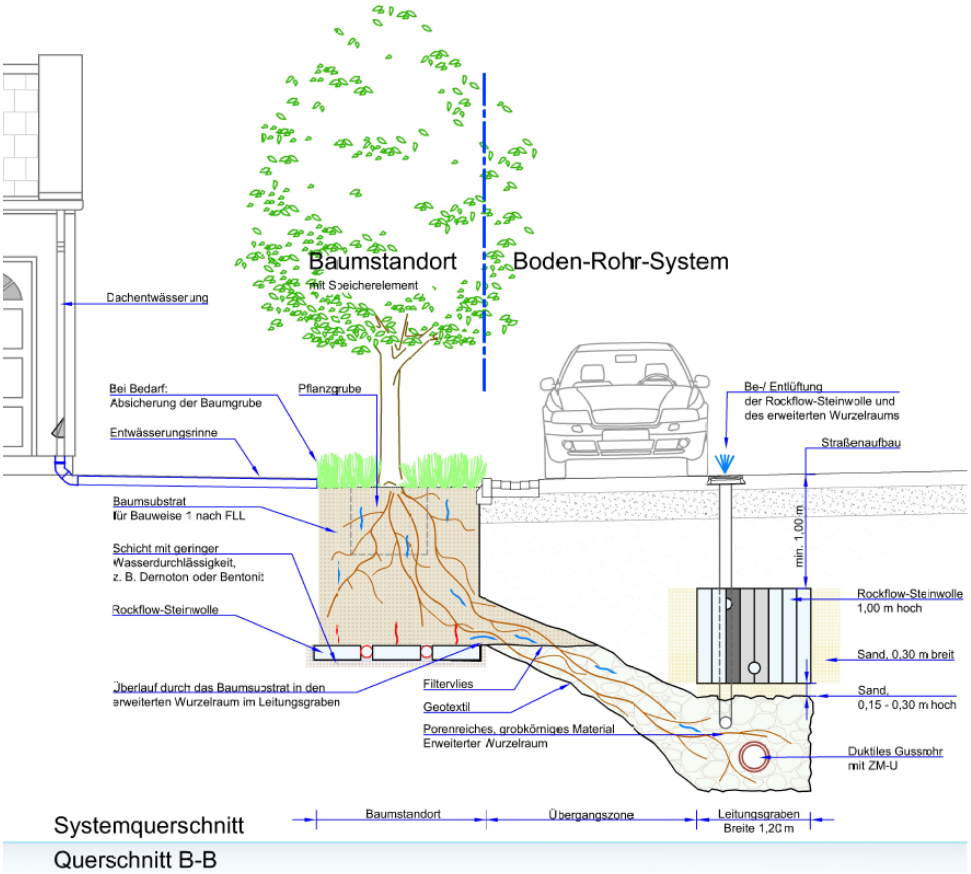


Abbildung 3-2: Querschnitt B-B durch das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (oberflächennahe Zufuhr des Niederschlagswassers)

Nachfolgend wird das Inhaltsverzeichnis der Handlungsempfehlung aufgelistet, um so einen Überblick über die Themen und Schwerpunkte zu bekommen:

1. Einführung
2. Funktionsweise des Boden-Rohr-Systems
3. Standortauswahl und Bestandsaufnahme
   3.1. Potenzielle Standorte und deren Nutzung
   3.2. Bestandsaufnahme des ausgewählten Standorts
4. Planung und Dimensionierung
   4.1. Belastungsklasse der Straße/ In-situ Feldversuche
   4.2. Dimensionierungen
      4.2.1. Niederschlagswasserspeicher des BRS
      4.2.2. Dimensionierung des Wurzelraums des BRS
   4.3. Auswahl der Baumarten
   4.4. Ausführung des Boden-Rohr-Systems: Baumaßnahme im Detail
      4.4.1. Rohrsysteme
      4.4.2. Niederschlagswasser-Speicherelemente allgemein
      4.4.3. Steinwolle (Rockflow) als innovatives dezentrales Entwässerungssystem
      4.4.4. Einbauanleitung für BRS-Elemente im Leitungsgraben
      4.4.5. Niederschlagswasser sammeln und vorbehandeln
5. Kosten und Nutzen des Systems
   5.1. Akteure und Rahmenbedingungen
   5.2. Kosten und Nutzen
   5.3. Finanzierung und Fördermittel
6. Genehmigungen
7. Unterhaltung und Wartung
8. Bewusstseinsbildung und Partnerschaften
9. Pilotprojekte
   9.1. Pilotprojekt Köln
   9.2. Pilotprojekt Leichlingen

3.2 Analyse von Klimaänderungssignalen (TAP 1.2)

Für die Auswertung der Klimaänderungssignale und ihre Auswirkungen auf Lufttemperatur und Niederschlag wurde der Hydrometeorlogische Rasterdatensatz (HYRAS – Datensatz) des Deutschen Wetterdienstes (Deutscher Wetterdienst, 2023) verwendet und mittels der Programmiersprache R ausgewertet. Die Rasterdaten für den Niederschlag liegen seit 1931 als Tagessummen vor und besitzen eine Größe von 1 km². Die Daten für die Temperaturen liegen als Tagesmaximum, Tagesmittel und Tagesminimum im Zeitraum 1951 – 2020 in einer Auflösung von 5 km x 5 km vor. Es wurden die Regionen Mülheim (Standort der HRW), Detmold, Köln und Leichlingen (alle drei Pilotregionen) analysiert. Aufgrund der Vergleichbarkeit wurden in allen Städten 3 x 3 Rasterfelder betrachtet. Die Positionierung der 3 x 3 Rasterfelder innerhalb einer Stadt erfolgte nach dem Zufallsprinzip.

3.2.1 Auswertung der Trockenperioden

Zunächst wurde der Niederschlag-Datensatz ausgewertet. Das BRS soll die Wasserversorgung von Bäumen in Trockenperioden sichern. Deswegen wurden Trockenperioden von 7, 14, 21 und 28 Tagen betrachtet, um herauszufinden, wie häufig diese Trockenperioden jährlich auftreten und ob es in der Vergangenheit eine Veränderung in ihrer Auftretenshäufigkeit gab. Zudem wurde ausgewertet, wie sich die Trockenperioden über das Jahr verteilen. Als Trockentag wird ein Tag mit weniger als 1 mm Niederschlag definiert. Bei kleineren Tagessummen wird davon ausgegangen, dass aufgrund von Benetzungs- und Muldenverlusten kein Oberflächenabfluss entsteht. Da sich die mittleren Auftretenshäufigkeiten pro Jahr in den vier Untersuchungsräumen nicht wesentlich unterscheiden (Tabelle 3-1), werden im Rahmen des Abschlussberichtes die nachfolgenden Auswertungen nur für die Pilotstadt Leichlingen dargestellt.

Tabelle 3-1: Mittlere Auftretenshäufigkeit der Trockenperioden pro Jahr in den vier Untersuchungsräumen im Zeitraum 1931 – 2022

Länge der Trockenperiode	Leichlingen	Köln	Detmold	Mülheim
7 Tage	9,0	10,2	8,7	9,6
14 Tage	1,8	2,3	1,7	1,9
21 Tage	0,36	0,49	0,27	0,32
28 Tage	0,07	0,07	0,07	0,07

Die Auswertungen der Trockenperioden für den Zeitraum 1931 – 2022 mit ihrer jährlichen Schwankungsbreite wird in Abbildung 3-3 dargestellt. Die 7-tägigen Trockenperioden, die in Blau dargestellt sind, traten jährlich zwischen 5- und 14-mal auf, wobei ihr Durchschnitt bei etwa neun Ereignissen pro Jahr liegt (Tabelle 3-2). Die Trendanalyse mit einer linearen Regression deutet auf eine geringfügige Zunahme der 7-tägigen Trockenperioden hin. Die 14-tägigen Trockenperioden sind in Orange gekennzeichnet und traten zwischen 0- und

7-mal pro Jahr auf, mit einem Durchschnitt von knapp zwei Ereignissen jährlich. Auch hier ist eine geringfügige Zunahme der Häufigkeit zu verzeichnen. Diese Trockenperioden korrespondieren mit den Ergebnissen aus den wasserbaulichen Untersuchungen (Kapitel 5.4) in denen eine Retentionswirkung von mindestens sieben bis 14 Tagen in den meisten Versuchen nachgewiesen werden konnte. Länger anhaltende Trockenperioden über 21 Tage traten dagegen im Mittel seltener als einmal pro Jahr auf, extreme Trockenperioden über 28 Tage wurden nur in sechs der 91 Jahre aufgezeichnet.

Tabelle 3-2: Mittlere Auftretenshäufigkeit der Trockenperioden pro Jahr in Leichlingen im Zeitraum 1931 – 2022

Länge der Trockenperiode	Absolutes Auftreten pro Jahr im Zeitraum 1931-2022	Mittleres Auftreten pro Jahr im Zeitraum 1931-2022
7 Tage	5 – 14 mal	9,0
14 Tage	0 – 7 mal	1,8
21 Tage	0 – 3 mal	0,36
28 Tage	0 – 1 mal	0,07

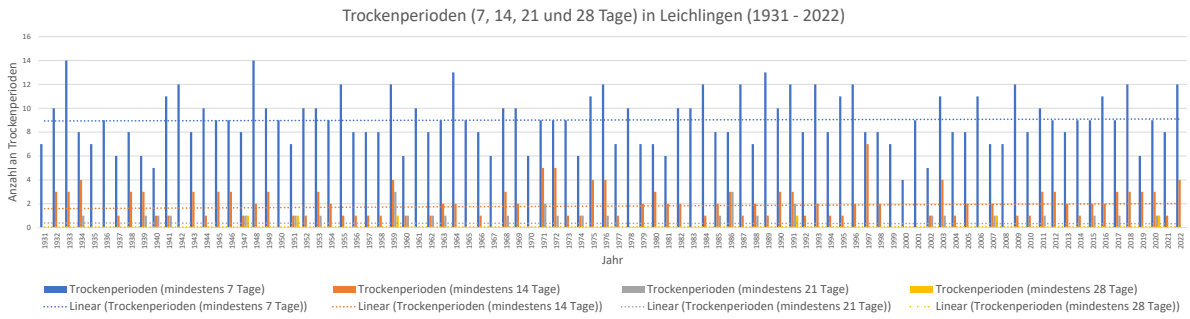


Abbildung 3-3: Auswertung der Trockenperioden in Leichlingen im Zeitraum 1931 – 2022

Weiterhin wurde die Verteilung der Trockenperioden über das Jahr ausgewertet (Abbildung 3-4). Die zeitliche Verteilung der Trockenperioden im Jahresverlauf ist von besonderem Interesse, da während der Vegetationsperiode ein erhöhter Wasserbedarf der Bäume besteht. In diesen Monaten ist daher eine ausreichende Wasserversorgung essenziell, um das Pflanzenwachstum optimal zu unterstützen.

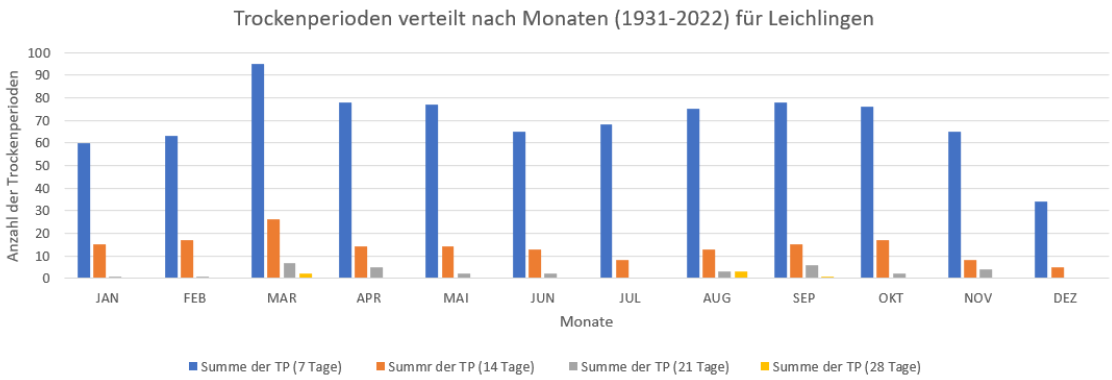


Abbildung 3-4: Verteilung der Trockenperioden über den Jahresverlauf für Leichlingen im Zeitraum 1931 – 2022

Die Auswertung (Abbildung 3-4) zeigt auffällig, dass der Monat März die höchste Anzahl an Trockenperioden im gesamten Jahresverlauf verzeichnet. In diesem Monat treten sowohl kurze (7-tägige) als auch längere Trockenperioden von bis zu 28 Tagen vermehrt auf. Dies ist besonders relevant, da in diesem Zeitraum der Wasserbedarf der Bäume signifikant zu steigen beginnt (Matyssek et al., 2010), was insbesondere in dicht bebauten Gebieten mit eingeschränktem Zugang zu natürlichem Bodenwasser potenziellen Stress für die städtische Vegetation erzeugen kann. Der Nutzen des BRS ist im Frühjahr (insbesondere im März) daher besonders groß, da hier die größte Diskrepanz zwischen natürlichem Wasserdargebot und Wasserbedarf der Bäume besteht.

Neben dem März stechen auch noch die Monate August und September heraus, die bisher neben dem März die einzigen Monate mit extremen Trockenperioden über 28 Tage darstellen und in denen mit grundsätzlich hohen Temperaturen zu rechnen ist. Im Winter (Dezember – Februar) sowie im Frühsommer (Juni / Juli) treten dagegen i.d.R. die wenigsten Trockenperioden über alle Dauerstufen im Jahresverlauf auf.

3.2.2 Auswertung der Niederschläge vor den Trockenperioden

Entscheidend für die Nutzung des BRS ist eine reale Wasserverfügbarkeit durch Niederschlagsereignisse vor den zuvor betrachteten Trockenperioden. Eine Analyse der Zeitreihe 1931 bis 2022 zeigt, dass im Durchschnitt etwa drei Tage vor Beginn einer Trockenperiode Niederschläge auftraten. Diese jeweils drei Tage vor allen erfassten 7-Tage Trockenperioden (enthalten auch die längeren Trockenperioden) wurden hinsichtlich der gemessenen Niederschlagssummen analysiert (Tabelle 3-3). Diese Niederschlagsmengen tragen potenziell zur Auffüllung des BRS vor einer Trockenperiode bei und stellen eine wertvolle Grundlage für die Einschätzung der realen Wasserversorgung dar. Die Schwankungsbreite der Niederschlagssummen variiert regional etwas stärker als die Auftretenshäufigkeit der Trockenperioden, weshalb neben den Werten für Leichlingen in Klammern auch die Niederschlagssummen der anderen Regionen mit angegeben werden. Wie zu erwarten fallen die Niederschlagssummen der Städte in den tieferen Regionen (Köln und Mülheim) etwas geringer aus.

Der Median repräsentiert 50 % aller Fälle, d. h., dass vor jeder zweiten Trockenperiode mindestens 7,5 – 10,0 mm Niederschlag in den drei vorangegangenen Tagen gefallen ist. Vor drei von vier Trockenperioden (25. Perzentil) sind zumindest noch 3,9 – 4,7 mm Niederschlag gefallen, die in das BRS eingeleitet werden können.

Tabelle 3-3: Auswertung der Niederschlagsmengen vor Trockenperioden in Leichlingen (Köln / Detmold / Mülheim) im Zeitraum1931-2022

Niederschlagstage vor der Trockenperiode	25. Perzentil [mm]	Median [mm]
1 Tag	2,1 (1,9 / 2,0 / 1,8)	3,4 (3,2 / 3,5 / 3,1)
2 Tage	3,5 (3,1 / 3,8 / 2,7)	6,7 (5,6 / 7,2 / 5,0)
3 Tage	4,7 (3,9 / 3,9 / 4,2)	9,7 (7,6 / 10,0 / 7,5)

3.2.3 Auswertung von Temperaturdaten

Neben Trockenperioden und vorausgehenden Niederschlägen haben auch die in diesem Kapitel analysierten Temperaturwerte einen wesentlichen Einfluss auf die Vitalität der Vegetation, hier insbesondere der Stadtbäume. Neben der Analyse von Trockenzeiten ist daher auch eine Bewertung der Hitzeverhältnisse erforderlich. In der nachfolgenden Abbildung 3-5 wurden daher nicht nur Tage mit hohen Temperaturen (Sommer- und Hitzetage), sondern auch die genannten Kenntage ohne Niederschlag im Zeitraum von 1951 bis 2020 ausgewertet. Aufgrund der relativ geringen Schwankungsbreite in den vier untersuchten Regionen werden die nachfolgenden Auswertungen nur für die Pilotregion Leichlingen dargestellt.

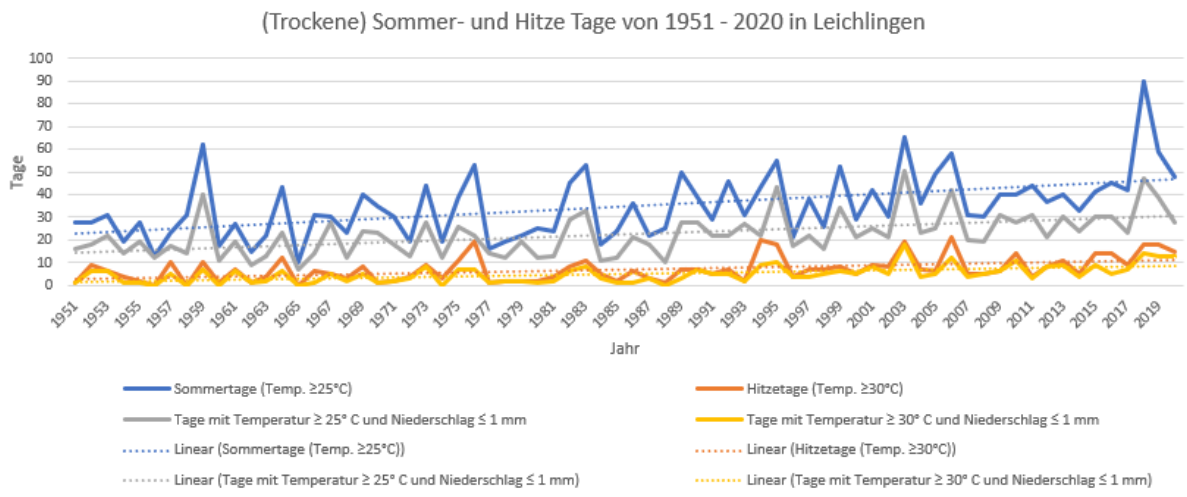


Abbildung 3-5: (Trockene) Sommer- und Hitzetage in Leichlingen im Zeitraum 1951 – 2020

Sommertage, definiert als Tage mit Tageshöchsttemperaturen ≥ 25 °C, sind durch die blaue Ganglinie dargestellt. Im Verlauf der Jahre ist ein deutlicher Anstieg der Sommertage zu beobachten. Diese Entwicklung weist auf eine zunehmende Häufigkeit warmer

Tage hin. Neben den Sommertagen werden Hitzetage, die durch Tageshöchsttemperaturen ≥ 30 °C gekennzeichnet sind, in orange dargestellt. Auch hier ist ein positiver Trend erkennbar, was auf eine Verschärfung der extremen Hitzeereignisse in den Sommermonaten hindeutet. Zusätzlich zur Temperatur werden in der Grafik auch Niederschlagsdaten einbezogen, um die Häufigkeit von trockenen Sommer- und Hitzetagen abzubilden. Trockene Sommertage, also Tage mit Tageshöchsttemperaturen ≥ 25 °C und einer maximalen Niederschlagsmenge von 1 mm, sind in Grau dargestellt. Der Verlauf dieser Ganglinie orientiert sich bis auf wenige Jahre qualitativ an der blauen Ganglinie und zeigt zudem, dass im Mittel drei von vier Sommertagen auch Trockentage darstellen. Auch Hitzetage sind meistens durch gleichzeitige Trockenheit gekennzeichnet. Die steigende Anzahl trockener und heißer Tage wird weitreichende Auswirkungen auf die lokale Vegetation, das städtische Mikroklima und die Wasserressourcen haben und erfordert daher sinnvolle Anpassungsmaßnahmen in der Stadtplanung, die z. B. durch das BRS umgesetzt werden können.

Die höheren Temperaturen in urbanen Räumen werden auch potentiell zu einem stärkeren Hitzeinseleffekt führen. Durch vitale Bäume (unterstützt durch die Wasserversorgung des BRS) kann dieser Hitzeinseleffekt durch stärkere Beschattung und größere Verdunstungskälte reduziert werden, sodass nachfolgend auch die Tropennächte für Leichlingen betrachtet werden (Abbildung 3-6). Als Tropennächte werden Tage bezeichnet, an denen die Tagesminimumtemperatur (selbst in der Nacht) nicht unter 20 °C sinkt.

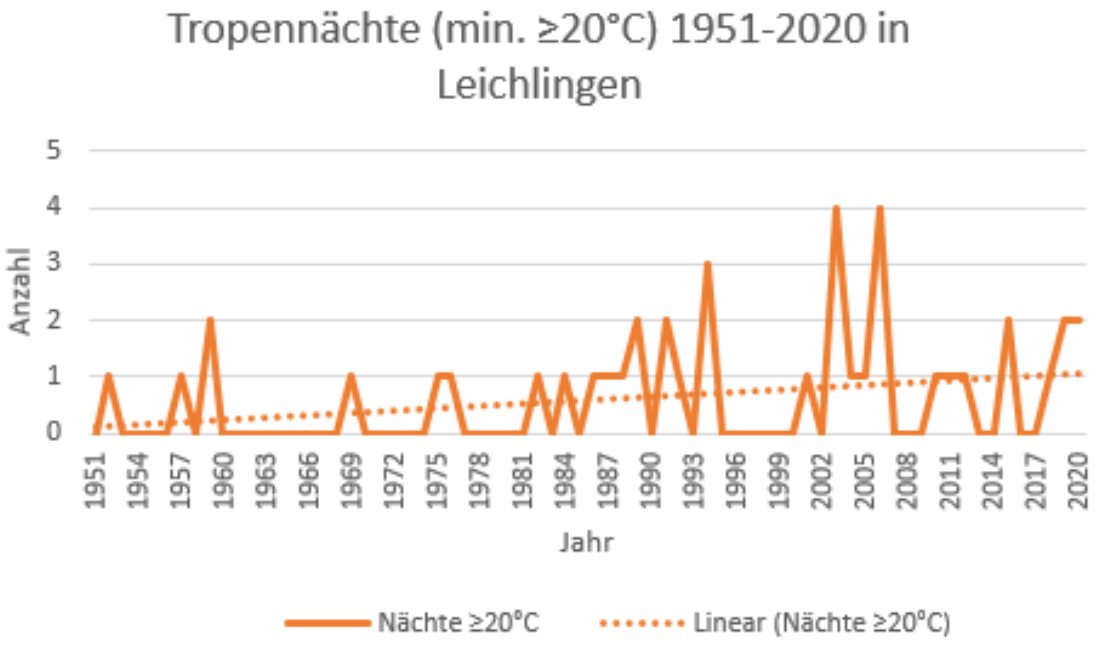


Abbildung 3-6: Tropennächte in Leichlingen im Zeitraum 1951 – 2020

Abbildung 3-6 zeigt zwei Ergebnisse. Zum einen gibt es immer weniger Jahre ohne eine Tropennacht, zum anderen treten in den letzten Jahren vermehrt Jahre mit zwei oder sogar mehr Tropennächten auf. Eine steigende Anzahl von Tropennächten kann erhebliche Auswirkungen auf das Wohlbefinden der Bevölkerung und die städtische Vegetation haben, da kühlere Nachttemperaturen zur Erholung und Abkühlung fehlen.

Zusätzlich zur Auswertung der Sommer- und Hitzetage wurden auch die Temperaturen für die kalten Kenntage, Frost- und Eistage, analysiert (Abbildung 3-7). Diese Kenntage sind Indikatoren für Zeiträume, in denen mit einem Einsatz von Streusalz auf den Straßen und Wegen zu rechnen ist. In zahlreichen Diskussionen mit Baumökologen wird der Salzeintrag in die Baumscheibe als maßgebliche Quelle für Schädigungen der Bäume genannt (u.a. GALK, 2024).

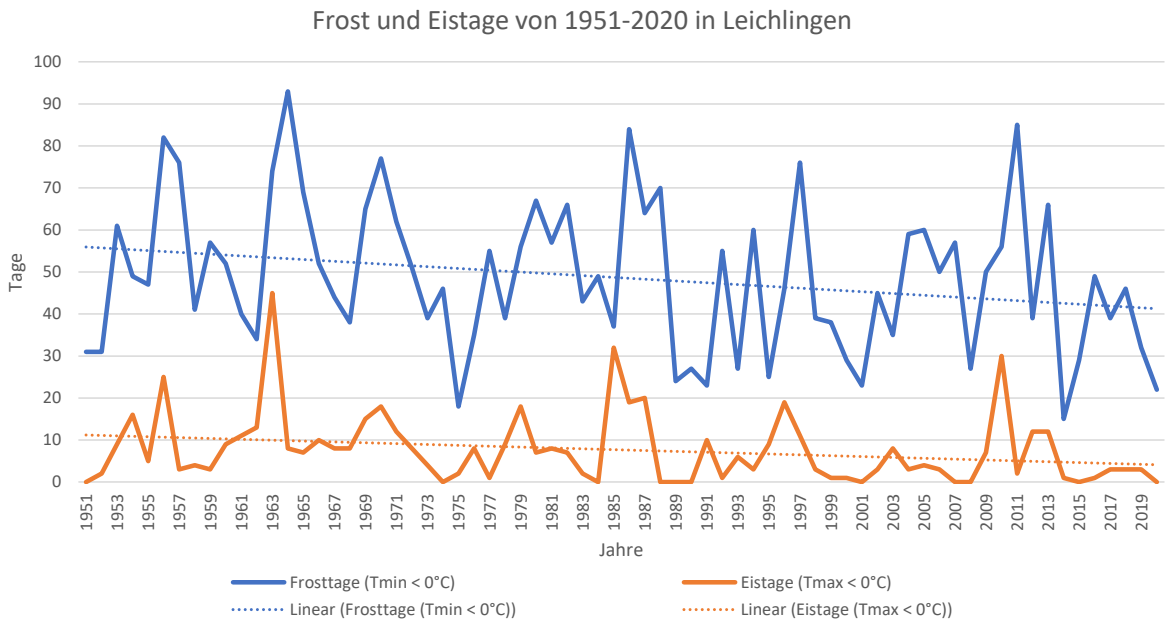


Abbildung 3-7: Frost- und Eistage in Leichlingen im Zeitraum 1951 – 2020

Sowohl die blau dargestellten Frosttage, definiert als Tage mit Tagesminimumtemperaturen unter 0 °C, als auch die gelb dargestellten Eistage, definiert als Tage mit Tagesmaximumtemperaturen unter 0 °C, zeigen eine generelle Abnahme der kalten Kenntage. Dies ist aus Sicht des BRS und der angeschlossenen Baumstandorte grundsätzlich positiv zu bewerten. Es sei aber darauf hingewiesen, dass es aufgrund der unterschiedlichen Klimate in Deutschland einen sehr unterschiedlichen Umfang beim Einsatz von Streusalzen gibt, sodass an dieser Stelle keine weitreichenden Aussagen getroffen werden können.

3.3 Bewertung der Maßnahme im Gesamtkontext (TAP 1.3)

Im Rahmen der Untersuchung zur Bewertung des BRS im Kontext wassersensibler Stadtentwicklung wurde eine umfassende Bewertungsmatrix entwickelt. Diese Bewertungsmatrix dient dazu, verschiedene Anpassungsmaßnahmen systematisch zu bewerten und miteinander zu vergleichen, um deren Wirksamkeit und Relevanz im Gesamtkontext der Blau Grünen Infrastruktur (BGI) angeben zu können. Sie stellt damit eine wichtige Grundlage dar, um die Position und den Nutzen des BRS innerhalb eines integrierten, urbanen Klimaanpassungskonzepts zu bestimmen. Die Entwicklung der Bewertungsmatrix basiert auf einer detaillierten Literaturrecherche, welche die folgenden zentralen Dokumente einbezieht:

BlueGreenStreets (BGS) Toolboxen: BGS war ein interdisziplinäres Forschungsprojekt, das sich mit der Entwicklung und Umsetzung von wassersensiblen Stadtstraßen befasst. Das Projekt hatte zum Ziel, Konzepte für eine klimaangepasste und resilientere Stadtplanung zu schaffen. Die Erkenntnisse aus diesem Projekt, in Form der Toolboxen, bilden eine wertvolle Grundlage zur Integration von BGI-Maßnahmen in der Stadtplanung (HafenCity Universität Hamburg, 2025).

Leitfaden für eine Wassersensible Stadt Köln: Dieser Leitfaden bietet praxisorientierte Empfehlungen und Konzepte zur wassersensiblen Stadtentwicklung in Köln. Er befasst sich mit der optimalen Nutzung von Regenwasser im urbanen Raum und dient als Orientierungshilfe für die Implementierung nachhaltiger und wassersensibler Stadtstrukturen (Stadtentwässerungsbetriebe Köln und Stadt Köln, 2018).

Merkblatt „Empfehlungen und Hinweise für eine zukunftsfähige Regenwasserbewirtschaftung und eine Überflutungsvorsorge bei extremen Regenereignissen" der Stadt Bremen: Dieses Merkblatt bietet spezifische Handlungsempfehlungen für die Stadt Bremen, um zukunftsfähige Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung und des Hochwasserschutzes zu fördern. Die Richtlinien dienen als wichtige Referenz zur Integration von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen in urbanen Räumen (Freie Hansestadt Bremen Senator für Umwelt, Bau und Verkehr (SUBV), 2015).

Planungshilfe für Grün- und Freiflächen, Schweiz (Bundesamt für Umwelt BAFU): Diese Planungshilfe des BAFU bietet umfassende Empfehlungen für die Gestaltung und Bewirtschaftung von Grün- und Freiflächen in der Schweiz, angepasst an die klimatischen und ökologischen Herausforderungen. Sie enthält Anleitungen zur Förderung der Biodiversität und zur Sicherung der Lebensqualität in urbanen Räumen (Sutter, V.; Amstein + Walthert AG, 2019).

Die Berücksichtigung dieser umfassenden und praxisorientierten Quellen stellt sicher, dass die Bewertungsmatrix auf einem wissenschaftlichen Fundament basiert und den aktuellen Stand der Forschung und bewährte Methoden der wassersensiblen Stadtentwicklung reflektiert. Insgesamt wurden 21 unterschiedliche Maßnahmen analysiert, um ein möglichst breites Spektrum an Anpassungsstrategien in den Bewertungsprozess einzubeziehen. Diese wurden nach den folgenden, in Tabelle 3-4 dargestellten, Kriterien bewertet.

Tabelle 3-4: Bewertungskriterien der verschiedenen Anpassungsmaßnahmen für die Einordnung in den Kontext der BGI

Bewertungskriterien	🔴	🟠	🟡	🟢	🟢	Einheiten
Speicherkapazität	0 – 150	151 – 300	301 – 450	451 – 600	601 <	Liter/ m³/ Element
Bewässerungspotential	0 – 15,0	15,1 – 40,0	40,1 – 60,0	60,1 – 80,0	80,1 <	Liter/ m³/ Element
Langzeitverfügbarkeit	< wenige Stunden	1 Tag	3 Tage	1 Woche	1 Woche <	Zeitdauer
Versickerung	$< 10^{-8}$	10^{-6} - 10^{-8}	10^{-5} - 10^{-6}	10^{-4} - 10^{-5}	10^{-4} - 10^{-3}	k_f-Wert in m/s
Verdunstung	0	2	5	11	20 <	Liter/ m²/ Tag
Wurzelraum	< 12		12		12 <	m²
Beschattung	Sehr gering	Gering	Mittel	Hoch	Sehr Hoch	Genaue Bewertung ist unmöglich
Überflutungsvorsorge	0 – 5	6 – 10	11 – 15	15 – 20	21 <	Anschließbare Fläche m²/ je m² Elementfläche
Synergien	Keine	1 andere Maßnahme	2 andere Maßnahmen	3 andere Maßnahmen	4 oder mehr andere Maßnahmen	Anzahl
Beteiligte	5 <	4	3	2	1	Anzahl
Platzbedarf	Zusätzlich oberirdische Fläche				Keine zusätzlich oberirdische Fläche	
Kosten	> 501	301 – 500	131 – 300	91 – 130	0 – 90	€/ m²
Anderes						

Um die Bandbreite der verschiedenen Kriterien differenziert zu bewerten, wurden fünf Wirksamkeitsklassen festgelegt. Diese Klassen ermöglichen eine visuelle Einordnung durch einen Farbcode, der eine schnelle und übersichtliche Bewertung der Anpassungsmaßnahmen erlaubt (Tabelle 3-4). In der folgenden Tabelle 3-5, ist ein Beispiel der Bewertung anhand des BRS und einer klassischen Baumrigole dargestellt.

Tabelle 3-5: Auszug aus der Bewertungsmatrix, Bewertung des BRS und einer Baumrigole

Bewertungskriterien		Boden-Rohr-System (erhoffte Werte)		Baumrigole
Speicherkapazität	🟢	1.588 l/laufenden Meter Leitungsgraben	🟢	ca. 480 – 680 l/m²
Bewässerungspotential	🟢	80,1 < l/m³	🟡	40,1 – 60,0 l/m³
Langzeitverfügbarkeit	🟢	2 Woche <	🟠	1 Tag
Versickerung	🟠	10^{-6} – 10^{-8} m/s	🟡	10^{-5} – 10^{-6} m/s
Verdunstung	🟢	je nach Element des Systems	🟢	über den Baum
Wurzelraum	🟢	12 < m²	🟢	12 m²
Beschattung	🟢	durch den Baum	🟢	durch den Baum
Überflutungsvorsorge	🟢	Anschließbare Fläche: 21 < m²/ je m² Elementfläche	🟢	anschließbare Fläche: 13 – 18 m²/ je m² Elementfläche
Synergien	🟢	Verkehrsberuhigung, wasserbewirtschaftende Maßnahmen	🟢	Verkehrsberuhigung, wasserbewirtschaftende Maßnahmen
Beteiligte	🔴	5 < Beteiligte	🟠	4 Beteiligte
Platzbedarf	🟡	Oberirdisch/ Unterirdisch	🟡	Oberirdisch/ Unterirdisch
Kosten	🔴	> 501 €/m²	🔴	> 501 €/m²
Anderes		Platz, unterirdische Infrastruktur, richtiges Substrat, Porenvolumen		Platz, unterirdische Infrastruktur, richtiges Substrat, Porenvolumen

Die in der Tabelle 3-5 verglichenen Systeme weisen oberirdisch eine ähnliche Struktur und denselben Platzbedarf auf, unterirdisch zeigt sich jedoch die spezifische Wirkung des BRS. Dieses System bietet eine wesentlich höhere Wasseraufnahmekapazität und ermöglicht es, einen Großteil des gespeicherten Wassers über mindestens zwei Wochen

gezielt zur Bewässerung des Baumes zu nutzen. Zudem erlaubt das BRS die Anbindung einer größeren Fläche an das System und der Baum kann sich im Wurzelraum entlang des Leitungsgrabens optimal ausbreiten. Dennoch bringt das BRS einige Herausforderungen mit sich: Die Baukosten sind im Vergleich zur herkömmlichen Baumrigole höher, und die Umsetzung erfordert mehr Koordinationsaufwand, da zusätzliche Beteiligte in den Bauprozess eingebunden sind.

Im Rahmen einer Abschlussarbeit wurde ein Decision Support System (DSS) entwickelt, das auf der zuvor erstellten Bewertungsmatrix basiert. Es handelt sich um ein Excel-basiertes DSS unter Nutzung von Visual Basic for Applications (VBA) zur Bewertung von Maßnahmen der BGI. Dabei wurde die Analyse der Anforderungen, die Umsetzung technischer Komponenten, die Gestaltung der Benutzeroberfläche und die Implementierung der Bewertungs- und Gewichtungsmechanismen im DSS berücksichtigt. Ziel der Abschlussarbeit war es, ein benutzerfreundliches und effizientes Tool bereitzustellen, das Anwendern fundierte Entscheidungen über BGI-Maßnahmen ermöglicht und damit zur klimaangepassten Stadtentwicklung beiträgt. Das Ergebnis kann in nachfolgenden Projekten grundsätzlich als Basis genutzt werden, um daraus ein voll funktionsfähiges und marktfähiges Produkt zu entwickeln.

4 Wasserbilanzierung / Regenwassermanagement (AP 2)

Die Ziele von AP 2 bestanden zum einen darin, eine Dimensionierungsvorschrift für den Speicherraum zu entwickeln. Zum anderen wurden mehrere Pilotprojekte initiiert und inhaltlich während der Projektlaufzeit begleitet, um so wesentliche Informationen aus der praktischen Umsetzung sowohl in die Systemskizze als auch in die Handlungsempfehlung einfließen lassen zu können. Ferner wurden die Anforderungen an das einzuleitende Regenwasser untersucht und beschrieben.

Die folgenden Unterkapitel beschreiben die wesentlichen Bearbeitungsschritte und Ergebnisse jedes Teilarbeitspaketes. Da viele Ergebnisse dieses Arbeitspaketes wesentliche Bestandteile der Handlungsempfehlung und der Dimensionierungsvorschrift sind, wird im Rahmen des Schlussberichtes nur kurz auf diese Punkte eingegangen und für weitere Details auf die Handlungsempfehlung und Dimensionierungsvorschrift verwiesen.

- TAP 2.1: Regenwassermanagement
- TAP 2.2: Qualitative Bewertung von stofflichen Belastungen
- TAP 2.3: Grundlagenermittlung und Vorplanung

Die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes sowie die nachfolgende Ergebnisdarstellung erfolgte federführend am Lehrgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Hydrologie und Wasserbau (Prof. Dr. Markus Quirmbach) der Hochschule Ruhr West.

4.1 Regenwassermanagement

Das BRS verbindet Baumstandorte mit bestehenden Leitungsgräben und Regenwasser-Speicherelementen und bietet somit eine nachhaltige Lösung zur Verbesserung der urbanen Baumversorgung. Durch die Nutzung der Leitungsgräben innerhalb von Straßen als Speicherraum für Niederschlagswasser und als erweiterten Wurzelraum für Stadtbäume wird zusätzlicher Platzbedarf an der Oberfläche vermieden. Der Systemaufbau wurde bereits im Kapitel 3.1 in einer Draufsicht (Abbildung 3-1) und einem Querschnitt (Abbildung 3-2) dargestellt. Weitere Details sind der Handlungsempfehlung, insbesondere den Kapiteln 2 und 4, zu entnehmen.

Die Dimensionierung des Niederschlagswasserspeichers erfolgt auf Basis der bestehenden Regelwerke (FLL, 2010; DWA 2024a; DWA, 2024b) und wird für ein Starkregenereignis mit der Wiederkehrzeit von T = 20 a ausgelegt. Weitere Details sind der Handlungsempfehlung (Kapitel 4.2.1) und insbesondere der umfangreichen Dimensionierungsvorschrift zu entnehmen, in der zudem ein Beispiel exemplarisch durchgerechnet wird. Beide Dokumente, Handlungsempfehlung und Dimensionierungsvorschrift, sind als Anhang diesem Schlussbericht beigefügt.

4.2 Qualitative Bewertung von stofflichen Belastungen (TAP 2.2)

Da mit dem BRS Niederschlagswasser versickert wird, sind grundsätzlich die Anforderungen an eine Versickerung nach DWA-A 138-1 (DWA, 2024b) zu prüfen. Wenn die Voraussetzungen für eine entwässerungstechnischen Versickerung nicht gegeben sind, muss das System, beispielsweise durch eine Ableitung des Wassers an eine Kanalisation, entsprechend modifiziert werden.

Die Behandlungsanforderungen des Niederschlagswassers vor einer Versickerung richten sich ebenfalls nach dem DWA-A 138-1 (DWA, 2024b) und sind im Wesentlichen auf die Vorgaben des DWA-A 102-2 (DWA, 2020) zurückzuführen. Die an das BRS angeschlossenen Flächen sind i.d.R. Dachflächen, Straßen- und Gehwegflächen. Das von diesen Flächen abgeleitete Niederschlagswasser kann unterschiedliche stark belastet sein (Abbildung 4-1), z. B. durch

- Abgabe von Stoffen aus den verwendeten Werkstoffen des Dachmaterials,
- Erosion und Abfall,
- Reifen- und Straßenabrieb sowie Tropfverluste von Fahrzeugen,
- oder durch Blätter, Blüten und Pollen.

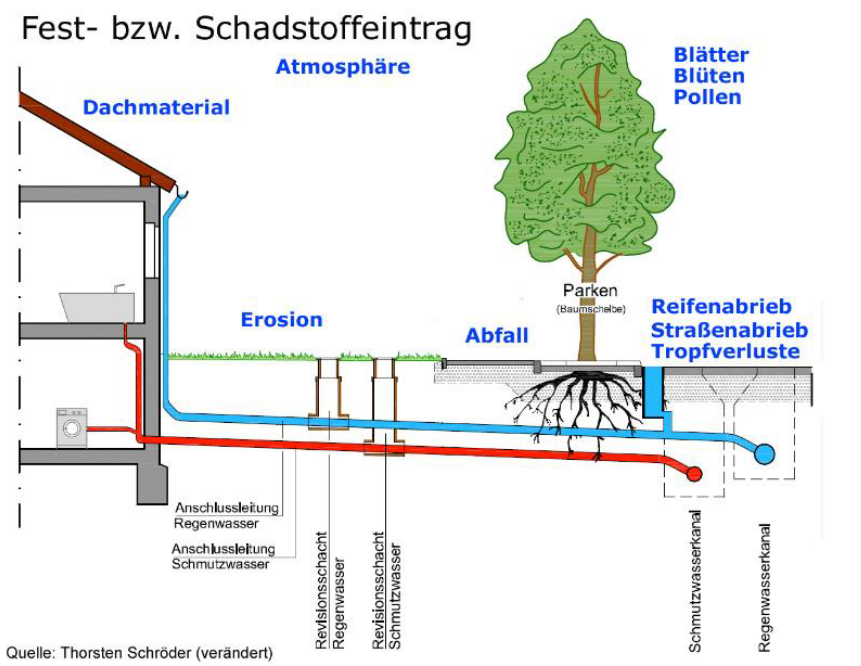


Abbildung 4-1: Fest- bzw. Schadstoffeintrag über den Eintragspfad Niederschlagswasser

Die Kenntnisse über Art und Umfang der Verschmutzung von Niederschlagswasser sind in den letzten Jahren durch eine Vielzahl von Forschungsvorhaben gewachsen und führte auch zur Überarbeitung von Regelwerken, Verordnungen und Richtlinien. So wurde während der Laufzeit des Projektes ein wesentliches Regelwerk überarbeitet. Das Arbeitsblatt DWA-A 138-1 „Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser – Teil 1: Planung, Bau, Betrieb“ (DWA, 2024b) wurde im Oktober 2024 veröffentlicht. Im Zuge der Überarbeitung wurde insbesondere das Risiko für das Boden- und Grundwasser durch die Versickerung von Niederschlagswasser von Dachflächen neu bewertet. In einer

Fußnote wurde die Entscheidung über die Behandlungsbedürftigkeit des Dachwassers auf die Genehmigungsbehörden übertragen. Es ist daher jeweils individuell mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen, in welchem Umfang für das Niederschlagswasser von Dachflächen bei einer unterirdischen Versickerung eine Vorbehandlung vorzusehen ist. Dabei ist insbesondere zu klären, ob eine technische Niederschlagswasserbehandlungsanlage erforderlich ist, oder ob eine Durchströmung des Bodensubstrates am Baumstandort als hinreichend bewertet wird. Bei einer oberirdischen Einleitung wird zudem das Wurzelwachstum in die Zuleitungsrohre verhindert, da Wurzeln in Richtung des Wasserdargebots wachsen und daher zu erwarten ist, dass sie dem versickernden Wasser nach unten folgen (Wangenheim et al., 2020).

Eine Übersicht über Niederschlagswasserbehandlungsanlagen zur Vorbehandlung von Niederschlagswasser vor der Einleitung in Gewässer sowie für den hier relevanten Fall, bei der Einleitung in Boden- und Grundwasser, wurde 2024 vom Umweltbundesamt (UBA) als Anlage E zum Abschlussbericht „Entwicklung eines Laborprüfverfahrens zum Rückhalt von partikulären Stoffen in dezentralen Niederschlagsbehandlungsanlagen bei Einleitung in Oberflächengewässer“ (UBA, 2024) veröffentlicht.

In diesem Bericht wird unterschieden, zwischen

- Sedimentationsanlagen (Anlagen ausschließlich mit Sedimentationsraum),
- Sedimentationsanlagen mit erweiterter Sedimentation bzw. Dichtetrennung z. B. mittels eingebauter Lamellen oder Hydrozyklone und
- Anlagen mit Filter zum Feststoffrückhalt und/oder zum Rückhalt gelöster Stoffe als erste oder zweite Stufe.

Ein großes Problem stellt, trotz bestehender Niederschlagsbehandlungsanlagen, die Einleitung von Streusalz von Gehweg- und Straßenflächen in die Baumstandorte dar. Eine Einleitung von Niederschlagswasser, das durch Streusalze verunreinigt wurde, ist nicht zu empfehlen, da den Straßenbäumen dadurch große Schäden entstehen (GALK, 2024) und Chloride aktuell nicht in Behandlungsanlagen entfernt werden können (DWA, 2024b). Eine Vermeidung einer Einleitung solch belasteter Oberflächenabflüsse in den Baumstandort kann z. B. durch jahreszeitlich variable Ableitungen (über die bestehende Kanalisation im Winter, ansonsten über den Baumstandort) erfolgen. Dies ist allerdings mit einem erhöhten personellem und logistischem Aufwand, z. B. durch Schieber oder Barrieren, verbunden (Burkhardt, 2022).

4.3 Grundlagenermittlung und Vorplanung (TAP 2.3)

Zu Projektbeginn war eine Umsetzung des Projektstandes am Projektende in einem Pilotgebiet in Detmold vorgesehen. Bereits zu Projektbeginn hat sich aber abgezeichnet, dass eine fortlaufende Betreuung von (mehreren) Pilotprojekten bereits während der Projektlaufzeit einen essentiellen Mehrwert liefert, um theoretische Konzepte zumindest in die Planungspraxis umzusetzen und die Funktionalität und Wirksamkeit neuer Systeme unter realen Rahmenbedingungen zu testen. Durch die Pilotprojekte konnten sowohl die

Systemskizzen als auch die Handlungsempfehlung fortlaufend weiterentwickelt und optimiert werden.

In der dreijährigen Projektlaufzeit wurden die nachfolgenden vier Pilotprojekte initiiert:

- Stadt Leichlingen, Friedensstraße
- Stadt Köln, Marktplatzes an der Kemperwiese
- Stadt Wuppertal, Worringer Straße
- Stadt Detmold, Ringstraße und Adenauer Straße

Zum Projektende lag in den einzelnen Pilotprojekten ein unterschiedlicher Entwicklungsstand vor. Insbesondere Bedenken einzelner Akteure haben dazu geführt, dass bis zum Projektende die zum Teil schon sehr weit fortgeschrittenen Planungen noch nicht in die Umsetzung überführt werden konnten. Der größte Projektfortschritt konnte bis zum Projektende im Pilotprojekt der Stadt Leichlingen in der Friedensstraße erzielt werden. Dort liegt mittlerweile eine Genehmigung durch die Untere Wasserbehörde vor und es wird mit einem Baubeginn Mitte 2025 gerechnet. In der Handlungsempfehlung (Kapitel 9) werden exemplarisch die beiden Pilotprojekte Leichlingen und Köln detaillierter dargestellt.

5 Wasserbauliche Untersuchungen (AP 3)

Das Arbeitspaket 3 des Forschungsvorhabens BoRSiS befasst sich mit wasserbaulichen und hydraulischen Untersuchungen zum Rigolenkörper. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgt die praktische Umsetzung des BRS in Form einer Labor-Versuchseinrichtung (Demonstrator). Es werden insbesondere Untersuchungen zu den Füll- und Entleerungsvorgängen durchgeführt. Der Speicherraum muss bei einem Starkregenereignis in der Lage sein, sich schnell zu füllen, wobei gleichzeitig eine zeitlich verzögerte Entleerung zu gewährleisten ist, um eine möglichst starke Retentionswirkung zu erreichen. Es soll ein hoher Anteil des Niederschlags langfristig gespeichert werden, damit dieser den Pflanzen und Bäumen zur Verfügung gestellt werden kann. Aus den zuvor genannten Anforderungen lassen sich insbesondere Fragestellungen zu den Durchströmungsvorgängen ableiten, welche für die Befüll- und Entleerungsvorgänge von maßgeblicher Bedeutung sind.

Im Wasserbaulabor der Hochschule Bochum wird ein 1:1 Versuchsaufbau errichtet, in welchem verschiedene Materialien und reale Schichtaufbauten getestet werden können. In Abstimmung mit AP 4 erfolgt eine Identifizierung potenziell geeigneter Materialien sowie eine Analyse derselben im Versuchsaufbau. Der Demonstrator ist mit einer Vielzahl von Messeinrichtungen ausgestattet, welche eine detaillierte Analyse der Durchströmungsvorgänge ermöglichen. Zu den Messinstrumenten zählen ein magnetisch-induktiver Durchflussmesser (MID) zur präzisen Bestimmung der Zuflussmenge sowie mehrere Wasserstandssensoren zur Messung des Füllstandes. Des Weiteren kann der Ausfluss aus dem Testspeicher mit Hilfe eines Thomson-Wehrs gemessen werden.

Die folgenden Unterkapitel beschreiben die wesentlichen Bearbeitungsschritte und Ergebnisse jedes Teilarbeitspaketes:

- TAP 3.1: Aufbau eines Demonstrators für Grundsatzuntersuchungen an einem Rigolensystem
- TAP 3.2: Analyse und Kenntnisgewinn zum Befüll- und Entleervorgang von Rigolensystemen bei unterschiedlichen Beschickungsvarianten (punktuell, linienförmig)
- TAP 3.3: Erarbeitung von hydraulischen Bemessungsvorgaben von Rigolensystemen, insbesondere unter Berücksichtigung des Lastfalls „schnelle Entleerung“

Die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes sowie die nachfolgende Ergebnisdarstellung erfolgte federführend am Lehrgebiet Wasserbau und Hydromechanik (Prof. Dr. Christoph Mudersbach) der Hochschule Bochum.

5.1 Aufbau eines Demonstrators für Grundsatzuntersuchungen an einem Rigolensystem (TAP 3.1)

Im Wasserbaulabor der Hochschule Bochum wurde ein Demonstrator aufgebaut, an dem Grundsatzuntersuchungen für das BRS durchgeführt werden können. Hierfür wurde ein Stahlbehälter mit einer Breite von 1,25 m, einer Länge von 10,0 m und einer Höhe von 2,50 m aufgebaut. Dieser Behälter setzt sich aus einzelnen Stahlplatten mit den Abmessungen 1,25 m x 2,50 m zusammen und wurde mit Abdichtungsmasse gegen auslaufendes Wasser abgedichtet sowie an den Seiten abgestützt (Abbildung 5-1).

Der Versuch wird mittels einer Pumpe von der schmalen Seite des Behälters gefüllt. Hierbei wird die Pumpe mit Wasser aus dem Tiefbehälter des Wasserbaulabors gespeist. An dem Zulaufrohr des Behälters ist ein Magnetisch-Induktives-Durchflussmessgerät (MID) befestigt, welches den Durchfluss und damit den Zufluss des Behälters bestimmt. An den Seiten des Behälters wurden Bohrungen für die Messtechnik eingelassen sowie eine größere Öffnung für einen Auslass mit Absperrventil am Ende des Behälters. Der Rücklauf des Wassers aus dem Behälter erfolgt über den Auslass am Ende des Behälters, kann aber auch durch die Öffnungen für die Messtechnik an der Seite erfolgen. Zusätzlich können alle Öffnungen verschlossen werden, sodass der Versuchsbehälter eingestaut werden kann. Das ausfließende Wasser wird in den bereits vorhandenen Leitungsgraben des Wasserbaulabors zurückgeführt, der wiederum das Wasser in den Tiefbehälter leitet. Hier wird ein Thomsonwehr installiert, mit welchem anhand der Überfallhöhe der Durchfluss berechnet werden kann. Aufgrund der fehlenden Vollfüllung des Rohres beim Auslass kann hier nicht mit einem MID gemessen werden.

Durch die Öffnungen für die Messtechnik wurden Rohre verlegt und mittels einer Estrichsohle im Behälter fixiert. Außen am Behälter wurden Standrohre installiert. Mit Hilfe des Prinzips der kommunizierenden Röhren, nach dem sich der gleiche Wasserstand im Behälter und in den Standrohren einstellt, kann dann der Wasserstand des Behälters in den Rohren abgelesen bzw. über eine darin befindliche Drucksonde gemessen werden (Abbildung 5-2).

Während der Vorplanungen wurden geeignete Materialien für den Leitungsgraben evaluiert. Das angedachte System für den Leitungsgraben besteht aus einer Leitungszone und einem Speicherelement über der Leitungszone. Hierüber werden die für den Straßenaufbau erforderlichen Hauptverfüllungen angeordnet, die hier vernachlässigt werden, da sie sich nicht vom normgemäßen Leitungsgraben unterscheiden.

Abbildung 5-1: Seitliche Ansicht des Behälters mit der Zulaufpumpe und Rücklaufkanal (links) und Innenansicht des Versuchsbehälters (rechts))

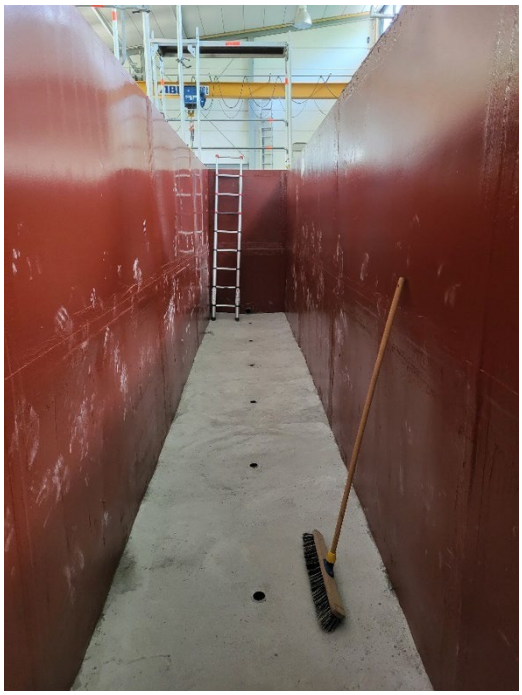


Abbildung 5-2: Gefüllte Standrohre mit integrierter Drucksonde und Verkabelung zum Datenlogger (links) und die Innenansicht mit eingebauter Estrichsohle und Trichtergefälle zu den verbauten Messrohren (rechts)

In diesem Projekt dient die Leitungszone als erweiterter Wurzelraum. Da über die Jahre gesehen die Wurzeln durch das Bodenmaterial wachsen sollen, muss dieser einen hohen Porenluftanteil aufweisen und gleichzeitig die Anforderungen für Baumrigolen nach Regelwerken der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) erfüllen. Neben den Anforderungen aus bodentechnischer Sicht muss eine

ausreichende Belüftung sichergestellt werden. Hierfür eignet sich auch ein Material mit großem Porenvolumen. Zudem ist eine große Porosität wichtig, da in den Poren zusätzlich Wasser zurückgehalten werden kann und den einwachsenden Wurzeln zur Verfügung steht. Zu beachten ist hierbei, dass die Einzelkörnungen des Bodenmaterials nicht zu groß sind, da ansonsten die Schichtdicken unterhalb, seitlich und oberhalb des Rohres zu groß für die Leitungszone werden. Deswegen fiel die Wahl für das Leitungszonenmaterial auf ein nach FLL zugelassenen Baumsubstrat aus Lava-Gestein, welches eine hohe Porosität aufweist und in der Körnung 32/64 mm vorliegt, wodurch die verschiedenen Randbedingungen mit großen Porenvolumen und Realisierung verschiedener teils dünnerer Schichtdicken erfüllt werden. Der Boden der Firma Vulcatec wird als Lavadrän 32/64 bezeichnet und wird in den Versuchen eingesetzt. Der Boden hat im eingebauten und verdichteten Zustand eine Dichte von 1175 bis 1300 kg/m³.

Der Speicherraum oberhalb der Leitungszone soll sich zum einen schnell befüllen lassen, um einen wirksamen Beitrag bei Starkregenereignissen liefern zu können. Andererseits soll die Entleerung des Systems zeitlich versetzt erfolgen, um eine möglichst starke Retentionswirkung zu erreichen. Zusätzlich sollte ein maßgeblicher Wasseranteil längerfristig gespeichert werden, um für die Versorgung der Bäume zur Verfügung zu stehen. Für den Leitungsgraben sind die Rockflow-Elemente mit einer Höhe von einem Meter vorgesehen. Hier sind auch Elemente mit einer Lüftung und einer Einleitung für die Wassermengen inkludiert. Der Aufbau des BRS ist in Abbildung 5-3 in vereinfachter Variante dargestellt. In der Abbildung ist noch nicht die erforderliche Sandschicht unterhalb der Rockflow-Elemente dargestellt. Damit diese Sandschicht lagestabil ist und dauerhaft bleibt, wird ein Geotextil zwischen dem grobkörnigen Lavasubstrat 32/64 und dem Rheinsand 0/2 erforderlich. Als geeignetes Geotextil stellte sich das Geotextil HaTe® E 800 BAW der Firma Hüsker heraus. Es besitzt eine flächenbezogene Masse von ca. 800 g/m² und eine Dicke von ca. 6 mm.

Abbildung 5-3: Exemplarisch Darstellung des Versuchsaufbaus im 1:1 Demonstrator

5.1.1 Vorversuche

Im Rahmen von Vorversuchen wurden zwei kleinere Versuche aufgebaut, mit dem Zweck verschiedene Zusammensetzungen von Materialien und Schichtaufbauten zu testen. Hiermit konnte ein mehrfacher sehr zeitaufwendiger Umbau des Großversuches vermieden werden. Für die Vorversuche wurden zwei 1250 l IBC-Container mit den Maßen 0,90 m x1,20 m x1,20 m verwendet (Abbildung 5-4). An der tiefsten Stelle der IBC-Container befindet sich ein Auslass, über welchen das eingeleitet Wasser wieder auslaufen kann und durch Behälter aufgefangen wird. In diesen Auffangbehältern wird über Drucksensoren dauerhaft der Wasserstand aufgezeichnet. Über eine Wasserstands-Speicherinhalts-Beziehung kann folglich die Wassermenge ermittelt werden. Der Zufluss der Kleinversuche erfolgt über Normgefäße mit zuvor abgewogenen Wassermengen in einem definierten Zeitintervall.

Abbildung 5-4: IBC-Versuchsbehälter für Vorversuche

Durch die Untergliederung des BRS in die zwei Teile Speicherraum und Leitungszone für den durchwurzelbaren Raum ist zunächst das Zusammenspiel dieser beiden Faktoren untersucht worden. Der Fokus der Untersuchungen lag hierbei auf der Speicherung des Wassers und der Speicherdauer. Zunächst wurden verschiedene Geotextilien mit unterschiedlichen k_f-Werten getestet sowie anschließend verschiedene Schichtdicken der Sandschicht. Auf Basis der Ergebnisse der Voruntersuchungen sollten bereits im Laufe des Forschungsprojektes Empfehlungen zu Schichtaufbauten und Materialzusammensetzungen gegeben werden.

Beide Kleinversuche waren über alle Versuche hinweg im Wurzelraum mit einem grobkörnigen Lavasubstrat mit der Kornverteilung 32/64 und einer Schichtdicke von 40 cm gefüllt. Es wurden drei verschiedene Geotextilien in den Kleinversuchen getestet, wobei zunächst im IBC-Behälter 1 ein einfaches statisches Geotextil mit einem k_f-Wert von 10^{-3}

[m/s] und im IBC-Behälter 2 ein Geotextil mit Aktivkohle und einer Folie mit einem k_f-Wert von 10^{-7} eingebaut wurde. Über den Geotextilien wurde als Ausgleichsschicht Rheinsand mit der Körnung 0/2 mm eingebaut. Als Speicherelemente wurden Rockflow-Elemente mit einer Höhe von 0,50 m verwendet. Ein exemplarischer Aufbau der beiden Behälter ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

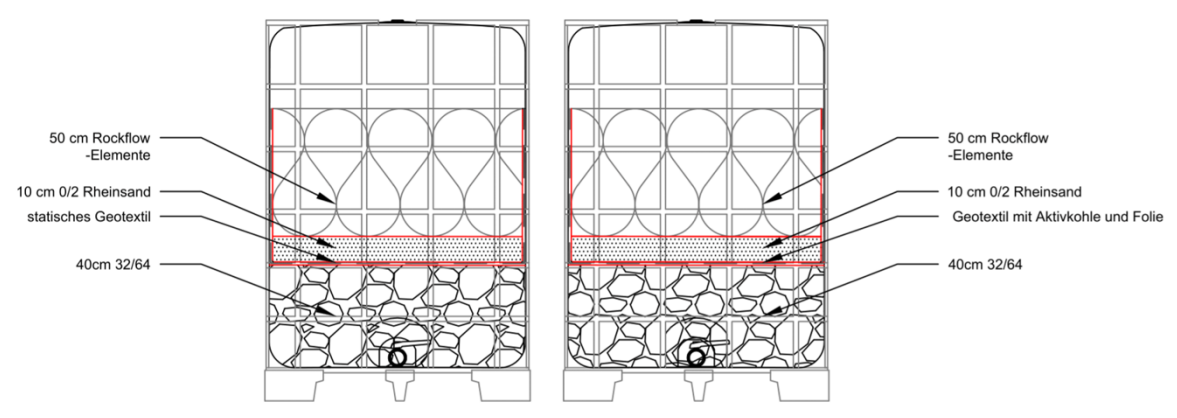


Abbildung 5-5: Aufbau der beiden Kleinversuche zu Beginn der Vorversuche mit zwei unterschiedlichen Geotextilien

5.1.2 Messeinrichtungen

Zur Erfassung sämtlicher Daten wurden sowohl der Großversuch als auch die beiden Kleinversuche mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet. Im Großversuch wurde der Wasserstand an der Längsseite an acht Stellen über Drucksensoren gemessen. Dazu wurden Standrohre an der Außenseite des Versuchsstandes angebracht und über das Prinzip der kommunizierenden Röhren konnte der Wasserstand entsprechend abgelesen bzw. gemessen werden. Zusätzlich wurden zwei Bodenfeuchtesensoren in die Sandschicht zwischen dem Rockflow und der Leitungszone eingebracht. In den Kleinversuchen wurde ebenfalls jeweils ein Bodenfeuchtesensor in die Sandschicht eingebracht und eine Drucksonde im Auslaufgefäß befestigt. Die Daten der jeweiligen Sensoren wurden über einen Datenlogger erfasst, gespeichert und alle 30 Minuten über eine SIM-Karte an ein Webportal gesendet. Über das Webportal konnten die Daten eingesehen und exportiert werden.

5.2 Konzept für Versuchsdurchführungen (TAP 3.2 & TAP 3.3)

Durch die Versuche im Wasserbaulabor der Hochschule Bochum sollten die grundsätzlichen hydraulischen Eigenschaften des BRS analysiert werden. Wichtig hierbei sind insbesondere die Themen der Befüllung und Entleerung des Systems bzw. der jeweiligen Bereiche. Hieraus ergaben sich für die Versuche die folgenden Forschungsfragen:

1. Wie lange dauern Befüll- und Entleerungsvorgänge?
2. Wie viel Wasser kann in welchen Bereichen gespeichert werden?
3. Wie lange kann dieses Wasser gespeichert werden bzw. dem Baum zur Verfügung gegeben werden?

Anhand dieser Fragen wurde ein Konzept für die Versuchsdurchführungen aufgestellt. Dieses sah vor, dass zunächst durch die Vorversuche in den IBC-Behältern die Wirkung der unterschiedlichen Materialien getestet werden soll. Durch die Untergliederung des BRS in die zwei Teile Speicherraum und Leitungszone für den durchwurzelbaren Raum ist zunächst das Zusammenspiel dieser beiden Bereiche untersucht worden. Die hier gewonnenen Daten wurden fortlaufend analysiert und die Versuche entsprechend angepasst bzw. verbessert. In Absprache mit den anderen Teilarbeitspaketen wurde anschließend eine finale Variante entwickelt, welche dann im Großversuch umgesetzt wurde. Bei allen Versuchen wurden zusätzlich verschiedene Wassermengen in unterschiedlichen Abständen hinzugegeben, um unterschiedliche Niederschlagsereignisse zu simulieren.

5.3 Analyse und Bewertung der Versuche (TAP 3.2 & TAP 3.3)

Im Laufe des Projektes wurden fortlaufend Versuche durchgeführt und analysiert. In den Kleinversuchen wurden rund dreißig Versuche durchgeführt. Aufgrund der hohen Anzahl der Versuche wird nachfolgend nur eine kleine Auswahl beschrieben.

5.3.1 Kleinversuche

Wie bereits zuvor beschrieben, wurden Vorversuche in den IBC-Behältern durchgeführt. Nach Befüllung der beiden Behälter mit dem Leitungszonenmaterial, einem 40 cm hohen Lavadrän 32/64, wurde die Speicherwirkung der Rockflow-Elemente getestet. Zu diesem Zweck wurden die Rockflow-Elemente direkt auf dem Lavadrän platziert. Es wurden sowohl kleinere als auch größere Mengen Wasser in kurzer Zeit direkt auf die Rockflow-Elemente gegossen. Das Wasser wurde umgehend durch die Elemente aufgenommen, ohne dass es zu einem Aufstau gekommen ist. Es zeigte sich aber auch, dass das Wasser direkt in die Leitungszone abgegeben wurde und somit keine Speicherwirkung durch die Rockflow-Elemente erzielt werden konnte. In der Folge wurde zwischen den Rockflow-Elementen und der Leitungszone Rheinsand sowie ein Geotextil eingebaut, wodurch eine Retentionswirkung erzielt werden konnte.

In den ersten Versuchen wurden unterschiedliche Geotextilien in die beiden Behälter eingebaut, um deren Wirkung analysieren zu können. So wurde zunächst ein statisches Geotextil mit einem Geotextil mit Aktivkohleanteil verglichen. Es stellte sich jedoch schnell heraus, dass die unterschiedlichen Geotextilien insbesondere im Bereich der Speicherwirkung keinen großen Unterschied machten. Daher entschied sich das Projektkonsortium für ein verhältnismäßig einfaches Geotextil, das bereits erwähnte Geotextil HaTe® E 800 BAW der Firma Hüsker.

Weiter wurde untersucht, welche Speicherwirkung insbesondere die Sandschicht aufzeigt. Wie bereits beschrieben, ergibt sich rein aus den Rockflow-Elementen keine Retention. Hierfür wurden zwei gleiche Versuche durchgeführt, wobei ein IBC-Behälter den normalen Aufbau mit Rockflow-Elementen und ein IBC-Behälter nur mit einer Sandschicht gefüllt wurde. Für den Versuchsaufbau ohne Rockflow sollte das Wasser jedoch nicht direkt auf die Sandschicht geleitet werden, weshalb ein Drainagerohr in die Sandschicht installiert wurde (Abbildung 5-6).

Abbildung 5-6: Versuchsaufbau ohne Rockflow-Elemente

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass es zu keinen signifikanten Abweichungen in der zeitlichen Abgabe der eingeleiteten Wassermenge gekommen ist. Lediglich zu Beginn der Abgabe in die Leitungszone zeigt sich ein minimaler Unterschied. So wurde in dem Behälter mit den Rockflow-Elementen in kurzer Zeit deutlich mehr Wasser abgegeben, ohne dass es am Ende des Versuchs zu großen Abweichungen kam. Dies lässt den Schluss zu, dass das Volumen im oberen Bereich des BRS deutlich schneller wieder zur

Verfügung steht. Der Verlauf der Wasserabgabe an die Leitungszone ist in Abbildung 5-7 dargestellt.

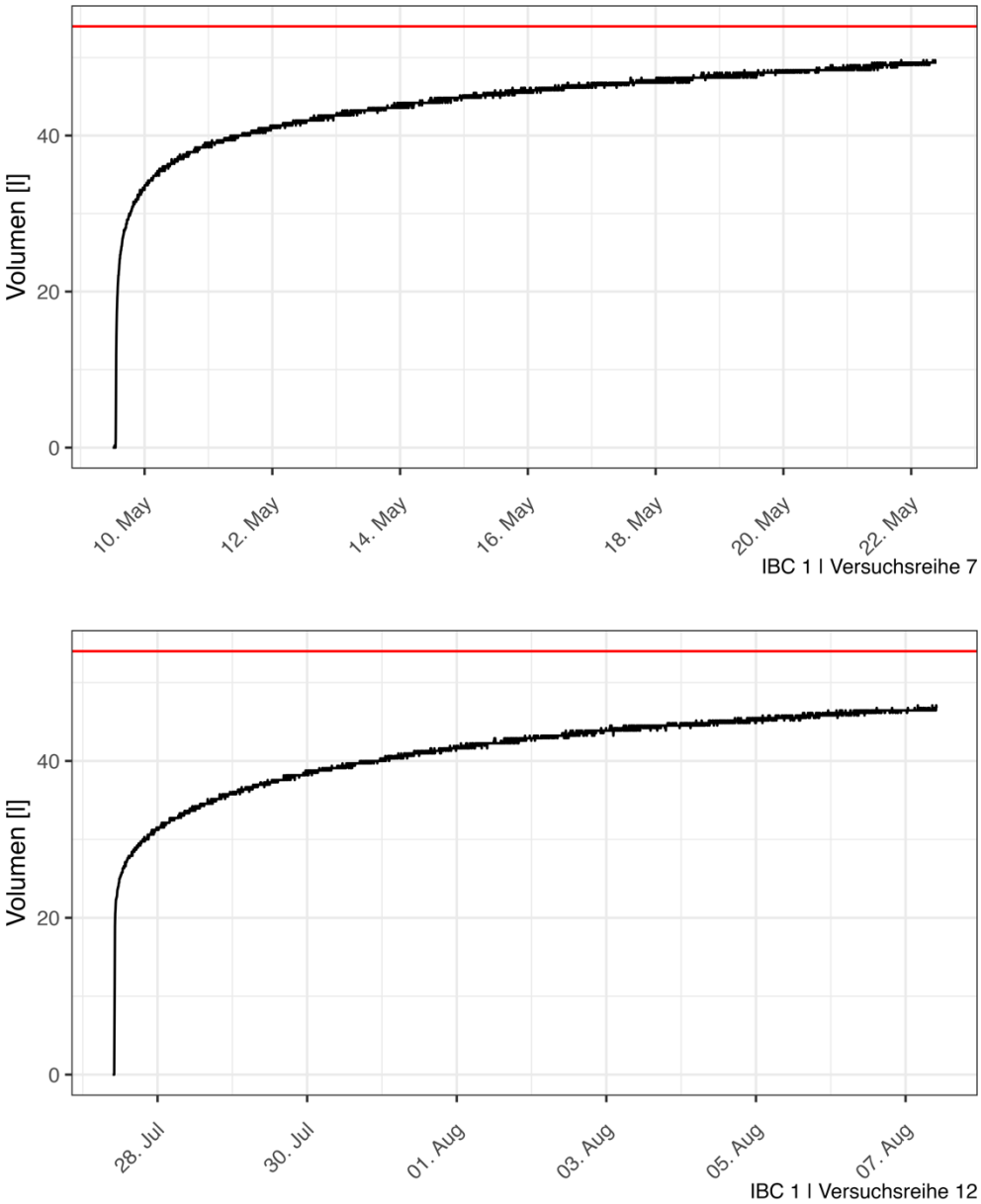


Abbildung 5-7: Vergleich der Speicherwirkung mit Rockflow (oben) und ohne Rockflow (unten)

Die Ergebnisse der Vorversuche wurden einer detaillierten Analyse unterzogen, um einen finalen Aufbau als Empfehlung zu identifizieren. Dieser wurde anschließend im Rahmen des Großversuchs umgesetzt. Der finale Aufbau umfasst eine Leitungszone mit einer Länge von einem Meter, die mit 1,00 m Lavadrän 32/64 der Firma Lavadrän gefüllt ist. Des Weiteren wird ein sechs Meter langes Gussrohr mit einem Durchmesser von DN 300 verbaut, welches an beiden Enden verschlossen wurde. Über der Leitungszone wurde ein Geotextil, das HaTe® E 800 BAW der Firma Hüskers, verbaut, um ein Ausgleichen mit der sich darüber befindenden 15 cm hohen Rheinsandschicht mit einer Körnung von 0/2 zu verhindern. Im Anschluss wurden auf die Sandschicht Rockflow-Elemente mit einer Höhe von einem Meter aufgebracht. In diesem Bereich wurden sechs Elemente in der

Breite und sieben Elemente in der Länge verbaut. Des Weiteren erfolgte eine Auffüllung der Ränder mit Rheinsand 0/2.

5.3.2 Großversuch

Parallel zu den Vorversuchen erfolgte der weitere Aufbau sowie erste Versuche im Großversuch. Die initialen Versuche ergaben, dass die eingeleitete Wassermenge nicht homogen über die gesamte Länge verteilt wurde. Zudem konnte festgestellt werden, dass das Wasser lediglich in den ersten zwei Metern in die Rockflow-Elemente gelang und sich teilweise sogar zurückstaute. In der Folge wurde ein Drainagerohr durch die integrierte Leitung des Rockflow-Systems gezogen, um eine gleichmäßige Verteilung des Wassers bis zum Ende des Rockflow-Systems zu gewährleisten (Abbildung 5-8).

Abbildung 5-8: Einleitung des Wassers in die Rockflow-Elemente am Einlauf mit Rückstau (links) und am Ende der Elemente mit zusätzlichen Drainagerohr (rechts)

Nachdem die Versuche in den IBC-Behältern abgeschlossen waren und der finale Aufbau im Großversuch umgesetzt wurde, sollten hier Versuche durchgeführt werden. In der Folge wurde ein äußerst geringer Zulauf gewählt, um den Versuchsstand mit der geringstmöglichen Geschwindigkeit zu füllen. Infolge der baulichen Gegebenheiten belief sich dieser Wert auf ca. 0,4 bis maximal 1 l/s. Im Rahmen dieses Versuches kam es zu einem Versagen des Versuchsaufbaus, welches im Folgenden kurz erörtert wird. Der Zulauf wurde während des Versuchs mehrfach überprüft und musste lediglich geringfügig angepasst werden. Vor Beginn der Mittagspause wurde eine weitere Überprüfung des

Zulaufs durchgeführt. Während der Mittagspause kam es jedoch zu einem Versagen des Versuchsaufbaus. Eine Analyse der aufgezeichneten Messdaten lässt den Schluss zu, dass ein technischer Defekt aufgetreten ist, der dazu geführt hat, dass sich der Schieber des Zulaufs geöffnet hat. Dies hat zu einer plötzlichen Erhöhung des Zulaufs auf über 20 l/s innerhalb kürzester Zeit geführt. Infolge der Überflutung des Versuchsstands in kürzester Zeit kam es zu einer Vielzahl von Beschädigungen, welche eine weitere Verwendung des Aufbaus unmöglich machen. In der Konsequenz dessen war es nicht möglich, weitere Versuche durchzuführen, da ein irreparabler Defekt entstanden war. Die in Abbildung 5-9 dargestellten Wasserstände der acht Drucksensoren resultieren aus den aufgezeichneten Messdaten.

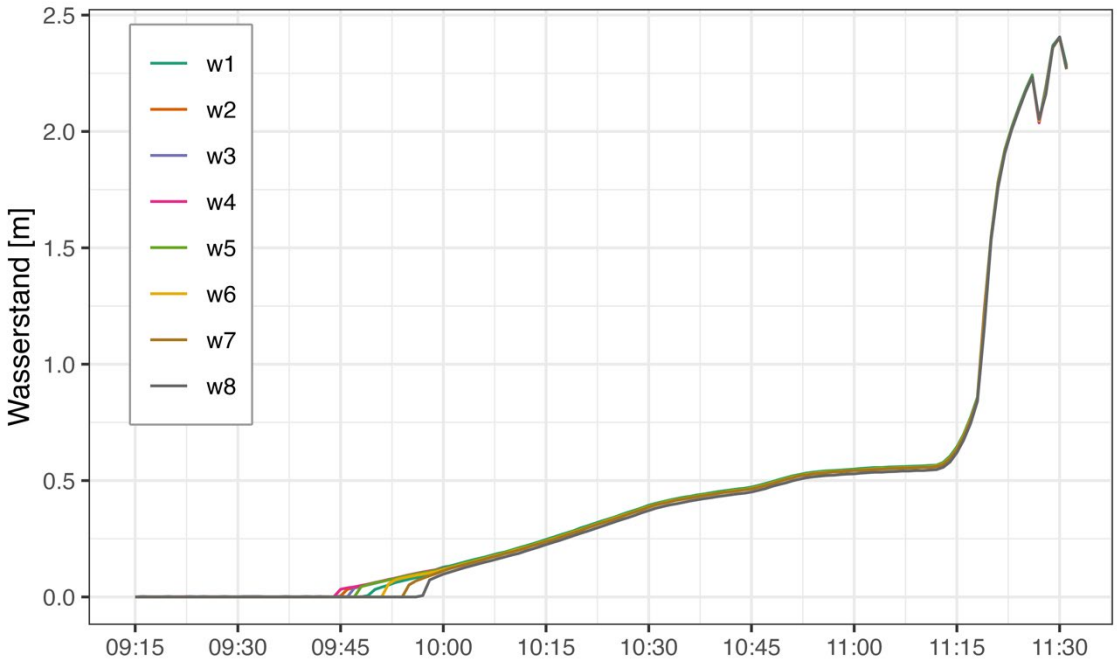


Abbildung 5-9: Wasserstände des Großversuchs

Dennoch konnten aus den Messwerten dieses Versuches bereits Erkenntnisse gewonnen werden. Somit konnte festgestellt werden, dass etwa 30 Minuten nach Beginn der Einleitung das Wasser an die Leitungszone abgegeben wurde. In der Folge konnte zunächst im mittleren Bereich und ungefähr zehn Minuten später im vorderen und hinteren Bereich der Leitungszone die Anwesenheit von Wasser nachgewiesen werden. Dies lässt den Schluss zu, dass das installierte Drainagerohr innerhalb der Rockflow-Elemente eine effektive Funktion aufweist. Des Weiteren konnte die jeweilige Wasseraufnahme in den unterschiedlichen Bereichen aufgezeichnet werden. Bis zum Detektieren des ersten Wassers im unteren Bereich sind 0,86 m³ in den Versuch geflossen. Folglich konnte diese Menge durch den Sand und die Rockflow-Elemente zurückgehalten werden. Eine separate Betrachtung des Sands sowie der Rockflow-Elemente war aus technischen Gründen nicht möglich. Bis die Leitungszone vollständig mit Wasser gefüllt war, wurden insgesamt rund 11 m³ Wasser eingeleitet. Subtrahiert man die 0,86 m³ von der zuvor ermittelten Menge, so ergibt sich ein Volumen von 10,14 m³ bei einer Leitungszonenlänge von 10 m. Alle hier angegebenen Mengen beziehen sich auf die Maße des Großversuchs.

Wird das Volumen der Leitungszone (10,14 m^3) auf eine angeschlossene Fläche von 265 m^2 (26,5 m^2 pro 1 m Haltungslänge) bezogen, ergibt sich theoretisch eine Niederschlagsmenge von rund 38 mm, welche durch die Leitungszone aufgenommen werden kann. Bei der Betrachtung der KOSTRA-Werte für den Standort Leichlingen würde dies für eine Wiederkehrzeit von 20 Jahren einem 120 Minuten Ereignis entsprechen (Abbildung 5-10). Wird eine Wiederkehrzeit von 100 Jahren betrachtet, könnte somit ein Ereignis mit einer Dauerstufe von 5 Minuten aufgenommen werden.

openko.de

Starkniederschlagshöhen und -spenden gemäß KOSTRA-DWD-2020

Rasterfeld 137102
(Zeile 137, Spalte 102)

Regenspende und Bemessungsniederschlagswerte in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit T und Dauerstufe D

		Wiederkehrzeit T																	
Dauerstufe D		1 a		2 a		3 a		5 a		10 a		20 a		30 a		50 a		100 a	
min	Std	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)
5		6,7	223,3	8,0	266,7	8,9	296,7	10,0	333,3	11,6	386,7	13,2	440,0	14,3	476,7	15,7	523,3	17,7	590,0
10		8,5	141,7	10,3	171,7	11,3	188,3	12,7	211,7	14,8	246,7	16,8	280,0	18,2	303,3	20,0	333,3	22,6	376,7
15		9,7	107,8	11,7	130,0	12,9	143,3	14,5	161,1	16,8	186,7	19,2	213,3	20,7	230,0	22,8	253,3	25,7	285,6
20		10,6	88,3	12,8	106,7	14,1	117,5	15,9	132,5	18,4	153,3	21,0	175,0	22,7	189,2	24,9	207,5	28,1	234,2
30		12,0	66,7	14,4	80,0	15,9	88,3	17,9	99,4	20,7	115,0	23,7	131,7	25,6	142,2	28,1	156,1	31,7	176,1
45		13,5	50,0	16,2	60,0	17,9	66,3	20,1	74,4	23,3	86,3	26,6	98,5	28,8	106,7	31,6	117,0	35,7	132,2
60	1	14,7	40,8	17,6	48,9	19,5	54,2	21,9	60,8	25,4	70,6	28,9	80,3	31,3	86,9	34,4	95,6	38,8	107,8
90	1,5	16,5	30,6	19,8	36,7	21,8	40,4	24,6	45,6	28,5	52,8	32,5	60,2	35,1	65,0	38,6	71,5	43,5	80,6
120	2	17,8	24,7	21,5	29,9	23,7	32,9	26,6	36,9	30,8	42,8	35,2	48,9	38,1	52,9	41,8	58,1	47,2	65,6
180	3	20,0	18,5	24,0	22,2	26,5	24,5	29,8	27,6	34,6	32,0	39,4	36,5	42,6	39,4	46,8	43,3	52,8	48,9
240	4	21,7	15,1	26,0	18,1	28,7	19,9	32,3	22,4	37,4	26,0	42,7	29,7	46,2	32,1	50,7	35,2	57,2	39,7
360	6	24,2	11,2	29,1	13,5	32,2	14,9	36,2	16,8	41,9	19,4	47,8	22,1	51,7	23,9	56,8	26,3	64,1	29,7
540	9	27,1	8,4	32,6	10,1	36,0	11,1	40,5	12,5	46,9	14,5	53,5	16,5	57,9	17,9	63,5	19,6	71,7	22,1
720	12	29,4	6,8	35,3	8,2	39,0	9,0	43,8	10,1	50,8	11,8	58,0	13,4	62,7	14,5	68,8	15,9	77,6	18,0
1080	18	32,9	5,1	39,5	6,1	43,6	6,7	49,0	7,6	56,8	8,8	64,8	10,0	70,1	10,8	77,0	11,9	86,8	13,4
1440	24	35,6	4,1	42,8	5,0	47,2	5,5	53,1	6,1	61,5	7,1	70,2	8,1	75,9	8,8	83,3	9,6	94,0	10,9
2880	48	43,1	2,5	51,8	3,0	57,2	3,3	64,3	3,7	74,5	4,3	85,0	4,9	91,9	5,3	100,9	5,8	113,9	6,6
4320	72	48,2	1,9	57,9	2,2	64,0	2,5	71,9	2,8	83,3	3,2	95,1	3,7	102,8	4,0	112,9	4,4	127,3	4,9
5760	96	52,2	1,5	62,7	1,8	69,2	2,0	77,8	2,3	90,2	2,6	102,9	3,0	111,3	3,2	122,2	3,5	137,9	4,0
7200	120	55,5	1,3	66,7	1,5	73,6	1,7	82,8	1,9	95,9	2,2	109,4	2,5	118,3	2,7	129,9	3,0	146,6	3,4
8640	144	58,3	1,1	70,1	1,4	77,4	1,5	87,0	1,7	100,8	1,9	115,1	2,2	124,4	2,4	136,7	2,6	154,2	3,0
10080	168	60,9	1,0	73,2	1,2	80,8	1,3	90,8	1,5	105,2	1,7	120,1	2,0	129,8	2,1	142,6	2,4	160,9	2,7

Seite 1 von 3

Angaben in mm: Bemessungsniederschlagswerte h(n)
Angaben in l / (s ha): Regenspende R(n)

Datenbasis: KOSTRA-DWD-2020 des Deutschen Wetterdienstes, Stand 12/2022.
Für die Richtigkeit und Aktualität der Angaben wird keine Gewähr übernommen. Erstellt 01/2023.

Abbildung 5-10: Starkniederschlagshöhen und -spenden gemäß KOSTRA-DWD-2020 für den Standort Leichlingen (Rasterfeld 137102), Quelle: openko.de (2023)

Insgesamt konnte durch den Versuchsaufbau eine Wassermenge von ungefähr 17,5 m^3 aufgenommen werden. Es konnte zusätzlich gezeigt werden, dass eine schnelle Aufnahme großer Wassermengen durch das System möglich ist.

5.4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens BoRSiS wurden im Wasserbaulabor der Hochschule Bochum hydraulische Versuche zum BRS durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde ein Großversuch im Maßstab 1:1 sowie zwei kleinere Versuchsaufbauten zur Durchführung von Vorversuchen errichtet. Die durchgeführten Versuche haben wesentliche Erkenntnisse im Bereich der Hydraulik geliefert, sodass eine Beantwortung der aufgestellten Forschungsfragen möglich war.

In Bezug auf die erste Frage *„Wie lange dauern Befüll- und Entleerungsvorgänge?“* konnte festgestellt werden, dass es bei Befüllvorgängen grundlegend zu keinem Rückstau innerhalb des Systems gekommen ist. Ein wesentlicher Aspekt, der zu einer effizienten Befüllung des Systems beiträgt, ist insbesondere die Zuleitungen vom Straßenraum in das System. Auch bei der Entleerung des Systems ist es zu keinen Problemen gekommen. Hierbei ist insbesondere der anstehende Boden der Leitungszone von entscheidender Bedeutung für die Entleerung des unteren Bereichs des BRS. Nach spätestens zwei Stunden nach Beginn der Einleitung des Niederschlags konnte eine Abgabe in den unteren Bereich der Leitungszone festgestellt werden. Innerhalb eines Zeitraums von sechs bis zwölf Stunden wurden etwa 60 bis 70 % des eingeleiteten Wassers an diesen Bereich abgeben. Nach maximal 24 Stunden wurden in der Regel bereits 75 bis 80 % abgegeben.

Bei der Frage *„Wie viel Wasser kann in welchen Bereichen gespeichert werden?“* konnte bestimmt werden, dass die Retentionswirkung nahezu ausschließlich durch die Sandschicht erfolgt. Die vorherige Annahme, dass die Rockflow-Elemente die Speicherwirkung übernehmen, konnte relativ schnell widerlegt werden. Dennoch sind diese ein wichtiges Element, da hierdurch eine schnelle Befüllung des Systems möglich ist.

Insbesondere die dritte Frage *„Wie lange kann dieses Wasser gespeichert werden bzw. dem Baum zur Verfügung gegeben werden?“* stellt einen wesentlichen Aspekt des Arbeitspakets 3 dar. Die durchgeführten Versuche haben ergeben, dass eine Retentionswirkung von mindestens sieben bis 14 Tagen in den meisten Versuchen nachgewiesen werden konnte. In einigen Fällen wurde sogar eine noch höhere Retentionswirkung beobachtet, sodass der Niederschlag bis zu vier Wochen zurückgehalten werden konnte. Die Ergebnisse belegen, dass das eingeleitete Wasser den Bäumen mindestens eine Woche lang zur Verfügung steht.

Ein Aspekt, der in den Versuchen nicht berücksichtigt werden konnte, ist die Versickerung des Wassers in den anstehenden Boden. Dies ist insbesondere von Relevanz, da auf Basis des anstehenden Bodens eine weitere Retentionswirkung vorhanden ist. Sofern der k_f-Wert des Bodens zu gering ist und somit eine Undurchlässigkeit vorliegt, ist die Installation eines Notüberlaufs im System zu empfehlen. Dies verhindert, dass das Wasser zu lange im System verbleibt und sich Staunässe bildet. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, das Wasser gezielt abzuleiten, falls es zu mehreren Niederschlagsereignissen innerhalb eines kurzen Zeitraums kommt.

6 Geotechnische Untersuchungen (AP 4)

Das Arbeitspaket AP 4 ist Teil eines geotechnischen Forschungsprojekts und umfasst vier Teilarbeitspakete (TAP), die sich auf die Untersuchung von Bodenmaterialien und deren Eignung für die Verfüllung von Leitungsgräben und Gussrohrleitungen konzentrieren. Ziel ist es, die mechanischen, hydraulischen und bautechnischen Eigenschaften des Bodenmaterials zu bewerten und geeignete Korngemische zu identifizieren.

Im Rahmen der geotechnischen Untersuchungen wurden zwei zentrale geotechnische Fragestellungen untersucht. Erstens sollte ein geeignetes Material identifiziert werden, das eine hohe Speicherkapazität für Regenwasser bietet. Zweitens war es erforderlich, die Tragfähigkeit des Systems mit dem verwendeten Material hinsichtlich der Anforderungen des Straßenbaus zu beurteilen. Der Grund hierfür liegt darin, dass das Material als Hauptverfüllung des Kanalgrabens und somit unterhalb des ungebundenen Straßenaufbaus eingebaut wird. Grundsätzlich wurden als potentielle Speichermaterialien mineralische Korngemische mit unterschiedlichen Korngrößenzusammensetzungen sowie eine mineralische Steinwolle untersucht.

Die folgenden Unterkapitel beschreiben die wesentlichen Bearbeitungsschritte und Ergebnisse jedes Teilarbeitspaketes:

- TAP 4.1: Bodenmechanische Laborversuche
- TAP 4.2: Erosionsversuche
- TAP 4.3: In-situ Feldversuche
- TAP 4.4: Numerische Strömungssimulationen

Die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes sowie die nachfolgende Ergebnisdarstellung erfolgte federführend am Lehrgebiet Geotechnik (Prof. Dr. René Schäfer) der Hochschule Ruhr West.

6.1 Bodenmechanische Laborversuche (TAP 4.1)

In den bodenmechanischen Laborversuchen wurden unterschiedliche Materialeigenschaften, wie Porengehalt, Verdichtungsverhalten und Zusammendrückbarkeit untersucht. Zu diesem Zweck wurden neben der Steinwolle insgesamt sieben mineralische Korngemische näher betrachtet. Vier davon (Sieblinien 0/11; 0/16; 0/22; 0/32) wurden unter der Voraussetzung untersucht, dass das Material einheitlich im gesamten Leitungsgraben (d. h. in der Leitungszone und der Hauptverfüllung) eingesetzt werden kann, wobei die Anforderungen an die Materialien aus den Straßenbau- (ZTV SoB-StB (2020)) und FLL-Richtlinien (2010) stammen. Als Bewertungskriterien hinsichtlich der Eignung wurde die Tragfähigkeit, das Speichervolumen n und die Wasserdurchlässigkeit k_f zugrunde gelegt. Im Zuge des Projekts wurde jedoch entschieden, die Leitungszone mit einem alternativen Substratgemisch aufzubauen, demzufolge wurden die Anforderungen der o.g. Materialien lediglich auf die der Hauptverfüllung hinsichtlich eines ausreichenden

Speichervolumens und einer ausreichenden Tragfähigkeit für den Straßenbau reduziert. In diesem Zusammenhang wurden drei Korngemische (Sieblinien 0/2;2/4;16/32, Abbildung 6-1) untersucht. Als Alternative zu den mineralischen Korngemischen wurde ebenfalls das Material „Steinwolle“ als Verfüllmaterial für die Hauptverfüllung des Leitungsgrabens in die Untersuchung mit aufgenommen. Das Ziel der bodenmechanischen Laborversuche bestand somit darin, aus den vorgenannten Materialien eine optimale Lösung unter Berücksichtigung des Speichervolumens und der Tragfähigkeit zu finden.

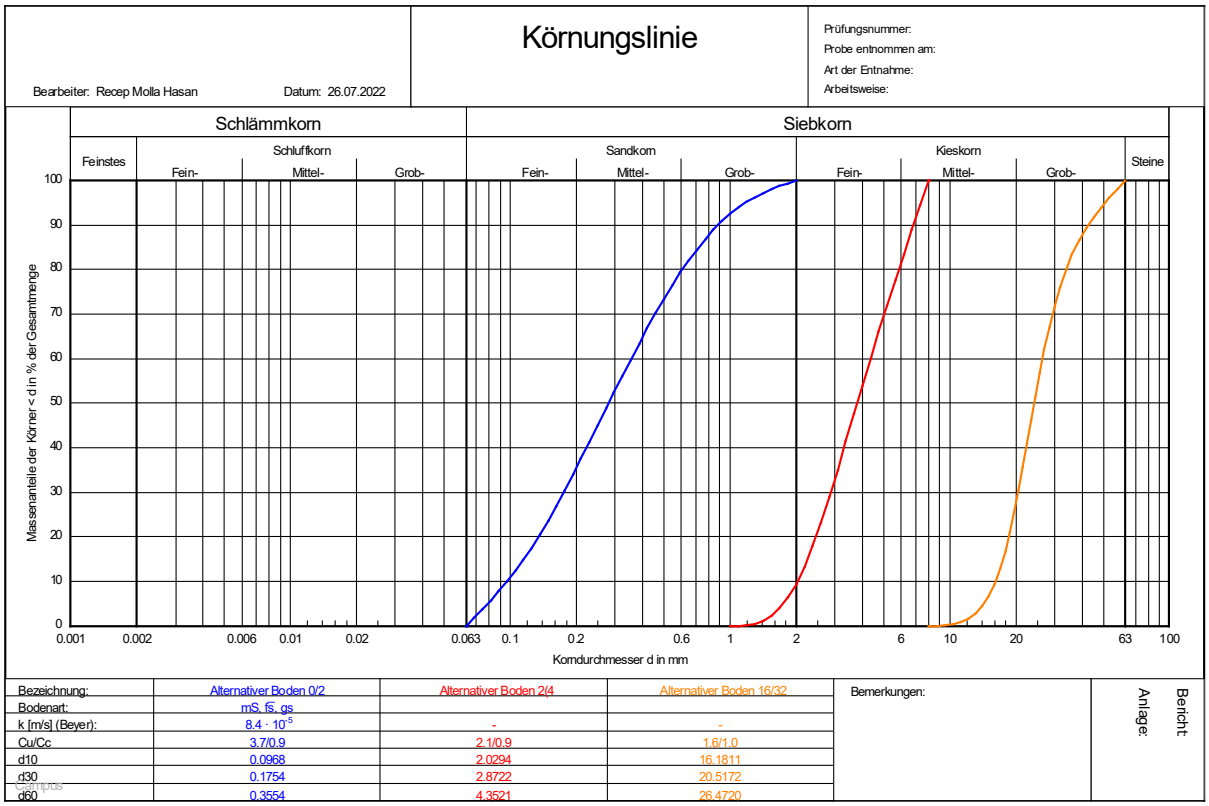


Abbildung 6-1: Sieblinien der untersuchten Korngemische 0/2; 2/4; 16/32 (eigene Darstellung)

Weiterhin wurden an den Materialien Proctorversuche durchgeführt, um die Proctordichte, den optimalen Wassergehalt und das Speichervolumen zu bestimmen. Mit Hilfe der Gleichungen (6-1) und (6-2) konnten der Porenanteil n und der Anteil der Luftporen n_a für alle untersuchten Gemische berechnet werden (Schmidt et al., 2014; Möller, 2016).

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \tag{6-1}$$

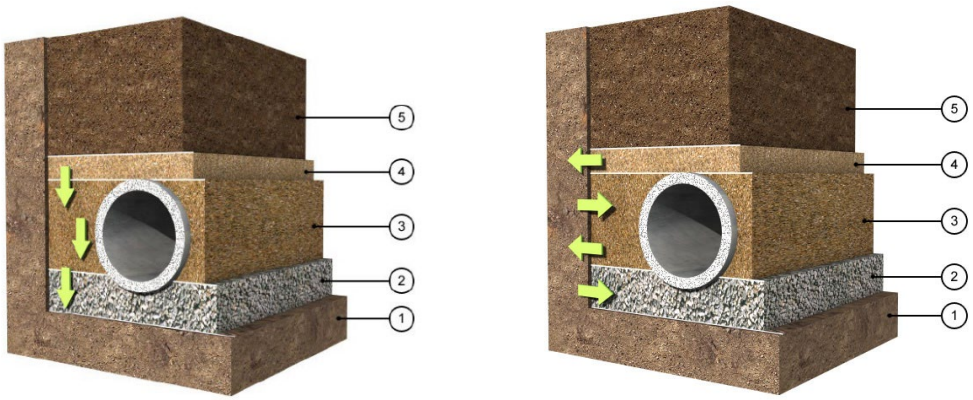
$$n_a = 1 - \frac{\rho_d \cdot (w \cdot \rho_s + \rho_w)}{\rho_w \cdot \rho_s} \tag{6-2}$$

Alle drei untersuchten Korngemische weisen vergleichbare Eigenschaften auf, wobei das Porenvolumen bei ca. 35 % liegt. Die Speicherkapazität der Steinwolle beträgt demgegenüber etwa 94% und liegt somit um den Faktor 2,7 höher. Aufgrund dieses sehr großen Unterschieds und der Erfordernis einer hohen Speicherkapazität des Materials ergibt sich

daraus die Konsequenz, dass die Verwendung von mineralischen Korngemischen aus hydraulischen Gesichtspunkten nicht weiterverfolgt und der Steinwolle als Speichermaterial grundsätzlich der Vorzug gegeben wurde. Die Ergebnisse der Versuche können aus der Handlungsempfehlung entnommen werden.

6.2 Erosionsversuche (TAP 4.2)

Aufgrund der eingesetzten, unterschiedlichen Materialien des Speichersystems ist die Sicherstellung einer ausreichenden Filterstabilität untereinander von Bedeutung, um langfristig einen Bodenentzug auf der einen Seite oder eine Kolmation der Speicherelemente auf der anderen Seite zu unterbinden. Die Filterstabilität muss sowohl für den anstehenden Boden als auch für die im Leitungsgraben untereinander befindlichen Böden gewährleistet sein. Abbildung 6-2 veranschaulicht die möglichen Materialtransportwege zwischen den unterschiedlichen Materialien innerhalb des Leitungsgrabens sowie des anstehenden Bodens.



Legende:

1. Anstehender Boden
2. Bettung
3. Seitenverfüllung
4. Abdeckung
5. Hauptverfüllung

Abbildung 6-2: Mögliche Suffusionen und Erosionen im verfüllten Leitungsgraben (visaplan GmbH, 2012)

Die Sicherstellung einer ausreichenden Filterstabilität kann zum einen über die Auswahl von entsprechend kornabgestuften Materialien erfolgen. Im Falle des BoRSiS-Speicherelements ist eine solche Festlegung schwierig bzw. nicht möglich, da sehr unterschiedliche Materialien verbaut werden sollen (siehe Handlungsempfehlung). Insbesondere kann das grobkörnige Material der Körnung 16/32 bzw. 32/64 innerhalb der Leitungszone gegenüber dem anstehenden, gewachsenen Boden sowie der oberhalb angeordneten Ausgleichsschicht aus Sand nicht filterstabil aufgebaut werden. Aus diesem Grund wird es erforderlich, die Leitungszone mit einem geeigneten Geotextil allseitig einzufassen,

welches hinsichtlich seiner Filter- und Rückhalteeigenschaften auf die Korngrößenzusammensetzung des anstehenden gewachsenen Bodens sowie der Zonen 2 und 3 (siehe Handlungsempfehlung) abzustimmen ist.

6.3 In-situ Feldversuche (TAP 4.3)

Abbildung 6-3 stellt beispielhaft den Aufbau des Straßenoberbaus und des darunter anstehenden Planums dar. Aus den Anforderungen des Straßenbaus (RStO) geht u. a. hervor, dass in Höhe des Planums ein Verformungsmodul von $E_{v2} \geq 45$ MN/m^2 nachgewiesen werden muss, um eine ausreichende Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Straße sicherstellen zu können (FGSV, 2012). Aufgrund der sehr geringen Steifigkeit der Steinwolle ist es erforderlich, eine ausreichend mächtige Überdeckungsschicht aus geeignetem, tragfähigen Bodenmaterial zwischen der Steinwolle und dem ungebundenen Straßenoberbau anzuordnen, um die o. g. Forderungen einzuhalten. Zur Festlegung der Überdeckungsmächtigkeit und der Zusammensetzung des Überdeckungsmaterials wurden daher Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, zu prüfen ob und wie der erforderliche Verformungsmodul von $E_{v2} \geq 45$ MN/m^2 nach Einbau der Steinwolle erzielt werden kann.

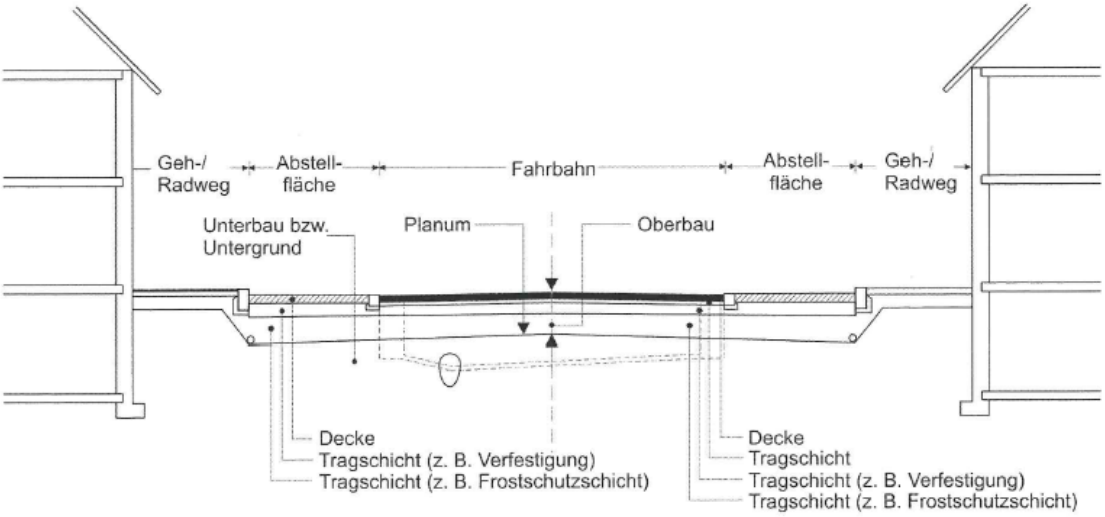


Abbildung 6-3: Beispielhafter Aufbau einer befestigten Straße, Quelle: (FGSV, 2012)

Um die erforderliche Tragfähigkeit von $E_{v2} \geq 45$ MN/m^2 im Straßenraum sicherzustellen, ist es sinnvoll, zunächst Untersuchungen zur Steifigkeit der Steinwolle durchzuführen. Hierfür können konventionelle Ödometerversuche durchgeführt werden, wobei jedoch ein Maßstabseffekt bei der Beurteilung des Systemverhaltens zu berücksichtigen ist. In Abbildung 6-4 ist das Ergebnis eines Ödometerversuchs an einer gesättigten Probe der Steinwolle bei monotoner Belastung dargestellt. Dabei handelt es sich um Versuche, die vor den Feldversuchen durchgeführt wurden, um die Steifigkeit des Materials abschätzen zu können. Der Steifemodul kann anhand der Spannungs-Setzungs-Kurve durch das Steigungsverhältnis ermittelt werden und beschreibt die Kompressibilität eines Bodens

zur Abschätzung der Setzung unter einer bestimmten Belastung. Bei der Versuchsdurchführung wird eine axiale Belastung stufenweise auf den Boden bei behinderter Seitendehnung aufgebracht. Dies entspricht den tatsächlichen Spannungs- bzw. Dehnungsverhältnissen im Baugrund, da seitliche Bewegungen bzw. horizontale Dehnungen durch angrenzende Bodenschichten eingeschränkt sind.

Aus Abbildung 6-4 ist zu erkennen, dass die Setzungen mit zunehmendem Spannungsniveau überproportional zunehmen. Dies bedeutet, dass die Steifigkeit der Steinwolle bei höherem Spannungsniveau abnimmt, obwohl die seitliche Dehnung versuchstypisch unterbunden ist. Dieses Verhalten unterscheidet sich grundlegend von dem Kompressionsverhalten eines mineralischen Bodens, bei dem die Steifigkeit mit zunehmendem Spannungsniveau aufgrund eines immer weiter abnehmendem Porenvolumens zunimmt. Zurückzuführen ist das unterschiedliche Kompressionsverhalten der Steinwolle auf die Faserstruktur des Materials. Aus Abbildung 6-4 ist zudem zu erkennen, dass bei einem Spannungsniveau zwischen ca. 50 und 100 kN/m^2 die Zusammendrückung des Materials erheblich zunimmt und die Verformungen einem Versagenszustand ähneln. Im Hinblick auf die Verwendung der Steinwolle als Verfüllmaterial unterhalb des Straßenoberbaus ergibt sich daraus die Konsequenz, dass die resultierenden Spannungen innerhalb der Steinwolle aus dem Straßenüberbau ein Maß von ca. 50 kN/m^2 nicht überschreiten sollten, um Verformungen zu begrenzen. Aus dieser Betrachtung resultiert die erforderliche Mächtigkeit einer tragfähigen Stabilisierungsschicht zwischen der Steinwolle und dem ungebundenen Straßenoberbau.

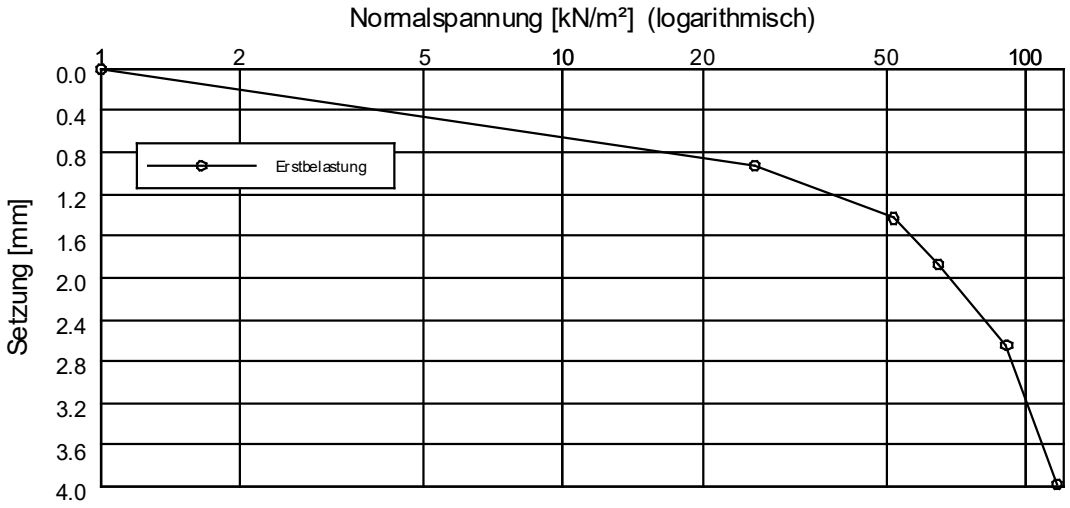


Abbildung 6-4: Ödometerversuch an einer gesättigten Steinwollprobe (eigene Darstellung)

Es wurden insgesamt acht Kompressionsversuche durchgeführt, bei denen die Proben jeweils über 5 Laststufen belastet wurden. Die Untersuchungen erfolgten sowohl unter gesättigten als auch unter ungesättigten Bedingungen. Bei allen Versuchen fiel ebenfalls auf, dass es ab einer Laststufe von 50 kN/m^2 zu einer signifikanten Setzung der Probe kam, was durch ein Versagen der Fasern (= Überbelastung) zu erklären ist. Die Ergebnisse der Versuche sind in Form des Steifemoduls im annähernd linear-elastischen Verformungsbereichs in Tabelle 6-1 zusammengefasst. Während der Versuche wurden

unterschiedliche maximale Spannungsniveaus erreicht. Für die gesättigten Proben konnte ein Versagen der Fasern bei einem Spannungsniveau von ca. 90 kN/m² und für die ungesättigten Proben bei einem Niveau von ca. 130 kN/m² beobachtet werden.

Tabelle 6-1: Auswertungen der durchgeführten Ödometerversuche an gesättigten und ungesättigten Proben (eigene Darstellung)

	Versuche			
	1	2	3	
Ödometerversuche	**Steifenmodul [MN/m²]**			**ø**
ungesättigt	2,3	2,4	1,5	2,07
gesättigt	1,2	1,09	0,99	1,09

Bei den Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass die Steinwolle im gesättigten Zustand geringere Steifigkeiten als im trockenen Zustand aufweist. Unabhängig vom Sättigungsgrad wird jedoch deutlich, dass die Steifigkeit der Steinwolle verhältnismäßig gering ist und tendenziell den Werten eines weichen organischen Bodens entspricht. Im Hinblick auf die geforderte Tragfähigkeit für den Straßenbau ist es daher erforderlich, eine zusätzliche Stabilisierungsschicht aus gut trag- und verdichtungsfähigem Material als Überdeckung über der Steinwolle vorzusehen. Die erforderliche Überdeckungsmächtigkeit resultiert dabei aus dem geforderten E_{v2}-Wert in Höhe des Erdplanums (= Oberkante Überdeckungsschicht).

Zur Festlegung der erforderlichen Mächtigkeit der Stabilisierungsschicht wurden in-situ Probefelder hergestellt, in denen die Steinwolle mit einer Höhe von jeweils 1,0 m eingebaut und mit einem Mineralstoffgemisch mit unterschiedlichen Mächtigkeiten zwischen d = 0,30 m bis d = 1,25 m überbaut worden ist. Für die Überprüfung der Tragfähigkeit im Hinblick auf die RStO (FGSV, 2012) wurden jeweils auf der obersten Schüttlage der Überdeckungsschicht statische Lastplattendruckversuche durchgeführt.

Es wurden insgesamt fünf Probefelder (Abbildung 6-5) für zwei unterschiedliche Bereiche (Bereiche 1 und 2) vorbereitet. Der erste Bereich beinhaltet die Untersuchung der Steinwolle mit der Variante WM 2005, während im zweiten Bereich die Steinwolle mit der Variante WM 2007 untersucht wurde. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Steinwollvarianten liegt in ihrer Faserdichte. WM 2007 weist eine höhere Faserdichte auf als WM 2005, wodurch das Material eine etwas höhere Steifigkeit aufweist. In jedem Probefeld wurden zwei statische und sechs dynamische Lastplattendruckversuche durchgeführt.

Abbildung 6-5: Aufbau der Probefelder (Sevriens, 2023)

Die Versuchsergebnisse für WM 2005 werden in zwei Diagrammen (Abbildung 6-6) grafisch ausgewertet. Abbildung 6-6a stellt die gemessenen statischen Verformungsmoduli E_{v2} und Abbildung 6-6b die dynamischen Verformungsmoduli E_{dyn} über der Dicke der Stabilisierungsschicht dar.

Aus den Ergebnissen der Abbildung 6-6a wird deutlich, dass der statische Verformungsmodul mit zunehmender Dicke der Stabilisierungsschicht annähernd linear zunimmt und bereits bei einer Überdeckungsmächtigkeit von 0,25 m die geforderte Tragfähigkeit von E_{v2} = 45 MN/m^2 erreicht werden konnte. Zudem weisen die Versuchsergebnisse eine verhältnismäßig geringe Streubreite auf.

Im Diagramm für die Auswertung des dynamischen Verformungsmoduls (Abbildung 6-6b) ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der dynamischen Lastplattendruckversuche im Vergleich zu den statischen Versuchen (Abbildung 6-6a) deutlich streuen. Demzufolge ist eine zuverlässigere Festlegung der erforderlichen Überdeckungsmächtigkeit bzw. eine Kontrolle der erzielten Tragfähigkeit anhand von statischen Lastplattendruckversuchen bevorzugt vorzunehmen. Die Auswertungsdiagramme für die Variante WM 2007 sind zur Vollständigkeit in Abbildung 6-7 dargestellt. Weitere Versuchsergebnisse zu den untersuchten Probefeldern sind in der Handlungsempfehlung aufgeführt.

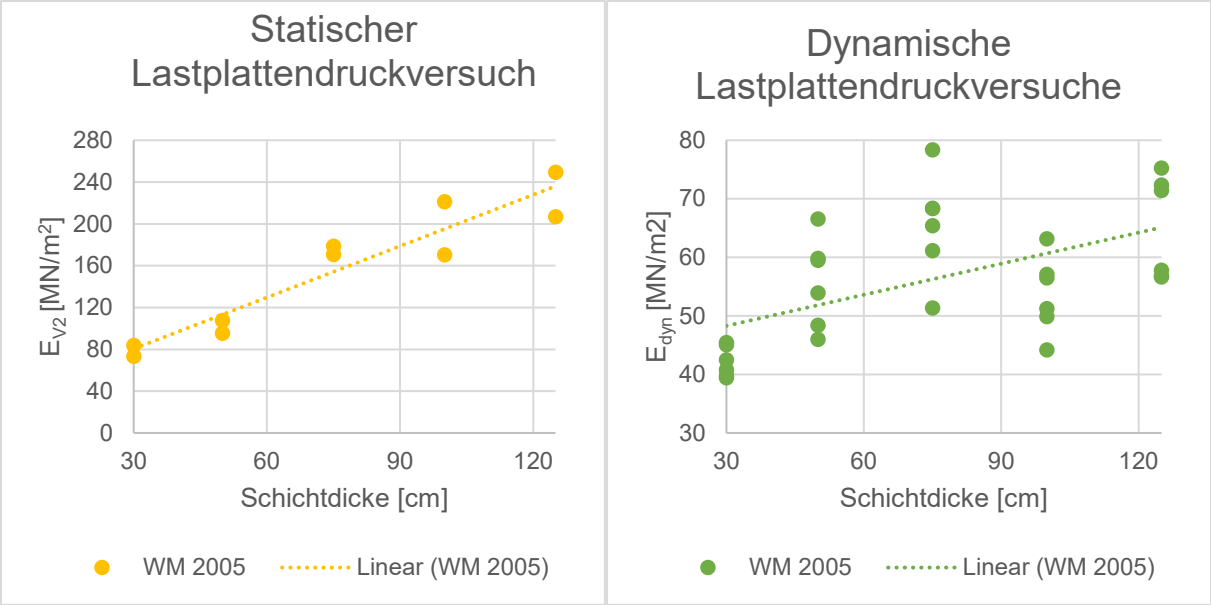


Abbildung 6-6: Trendlinie aus den a) statischen und b) dynamischen Lastplattendruck-versuchen für das Material WM 2005 (eigene Darstellung)

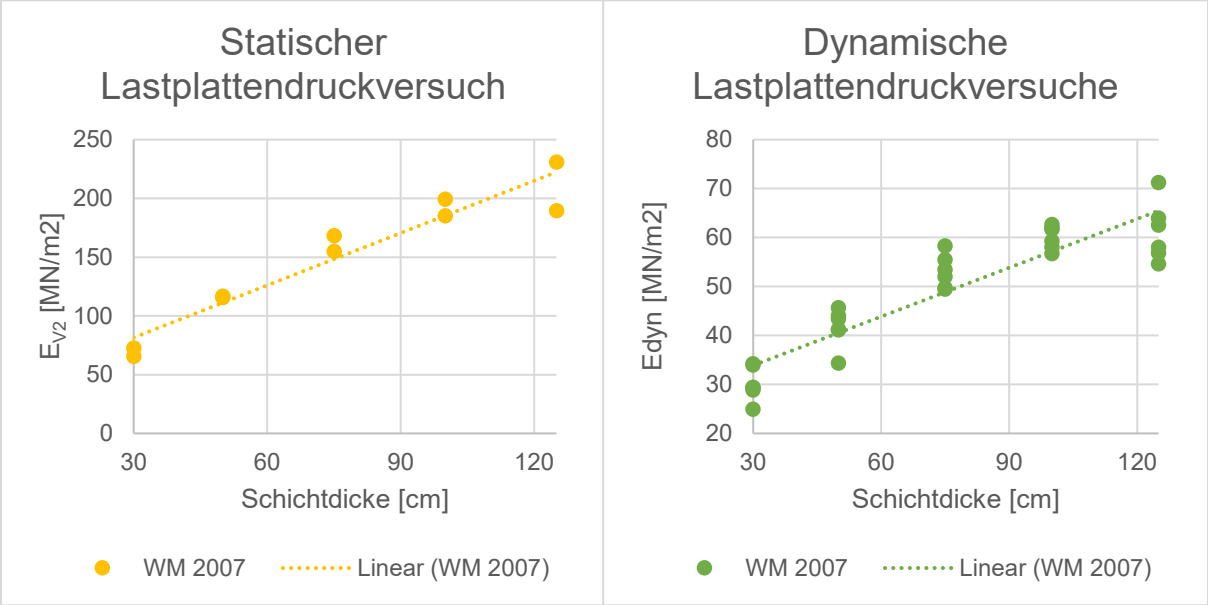


Abbildung 6-7: Trendlinie aus den a) statischen und b) dynamischen Lastplattendruck-versuchen für das Material WM 2007 (eigene Darstellung)

6.4 Numerische Strömungssimulationen (TAP 4.4)

Im Zuge der Feldversuche hat sich gezeigt, dass ausreichende Tragfähigkeiten bereits bei geringen Überdeckungsmächtigkeiten erzielt werden können. Unberücksichtigt bleibt bei dieser Überlegung jedoch der Sachverhalt, dass die im BSR verbaute Steinwolle später zyklischen Einwirkungen infolge des Straßenverkehrs ausgesetzt sein wird. Aus diesem Grunde wurden erweiterte Laborversuche durchgeführt, in denen das Zusammendrückungsverhalten der Steinwolle bei einer geringen Anzahl von Lastzyklen mittels elektro-pneumatischem Ödometer untersucht wurde. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die Entwicklung eines FE-Modells zur Nachrechnung der in-situ Feldversuche.

Ziel der Untersuchungen ist es, die Steifigkeit und das mechanische Verhalten von Steinwolle unter verschiedenen Be-, Ent- und Wiederbelastungsbedingungen zu untersuchen. Vergleichbar zu der oben beschriebenen Vorgehensweise wurde auch hier untersucht, ob der Wassergehalt die Steifigkeit des Materials unter zyklischer Einwirkung beeinflusst.

Ein weiterer Aspekt der Untersuchung betrifft den Einfluss der Querdehnung. Im eingebauten Zustand wird das Material durch den anstehenden Boden seitlich gebettet. Die Zusammendrückung erfolgt unter behinderter Seitendehnung (Ergebnis entspricht dem Steifemodul E_s). Angesichts der Faserstruktur der Steinwolle sollte geprüft werden, wie groß der Einfluss der seitlichen Bettung auf das Zusammendrückungsverhalten ist. Hierzu wurden zum Vergleich ebenfalls Kompressionsversuche mit einer unbehinderten Seitendehnung durchgeführt (Ergebnis entspricht dem E-Modul).

Tabelle 6-2 bietet eine Übersicht über die durchgeführten Versuche mit dem Ödometer. Für die zyklischen Untersuchungen wurden jeweils drei Versuche mit und ohne seitliche Behinderung im ungesättigten und gesättigten Zustand durchgeführt.

Tabelle 6-2: Übersicht der Versuche mit dem elektro-pneumatischer Ödometer (eigene Darstellung)

Zeile	Versuchsart	ungesättigter Zustand	gesättigter Zustand
1	Zyklische Untersuchungen (mit behinderter Seitendehung)	3	3
2	Zyklische Untersuchungen (ohne behinderter Seitendehung)	3	3

Insgesamt wurden jeweils vier Belastungszyklen (Abbildung 6-8) aufgebracht. Während der Erstbelastung weist die Verformung die höchste Dehnungsrate und die Steinwolle somit bis zum Eintritt des Versagens die geringste Steifigkeit auf. Während der Ent- und Wiederbelastungszyklen verlaufen die Spannungs-Dehnungskurven flacher und kennzeichnen somit eine höhere Steifigkeit. Auffällig ist, dass die Steifigkeit des Materials annähernd spannungsunabhängig ist und nur vom Spannungspfad abhängt. Abbildung 6-8 stellt hierzu das Spannungs-Dehnungs-Verhalten exemplarisch für einen Versuch dar. Aus dem Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurven ist zudem zu erkennen, dass ab

einem Spannungsniveau von ca. 110 kN/m² die Verformungen infolge eines Versagens der einzelnen Fasern stark zunehmen und die Steifigkeit des Materials schlagartig deutlich kleiner wird.

Tabelle 6-3 stellt zusätzlich die ausgewerteten Steifigkeiten in Abhängigkeit der unterschiedlichen Spannungspfade dar. Hierbei wird zwischen den Erstbelastungs- sowie den Ent- und Wiederbelastungspfaden unterschieden.

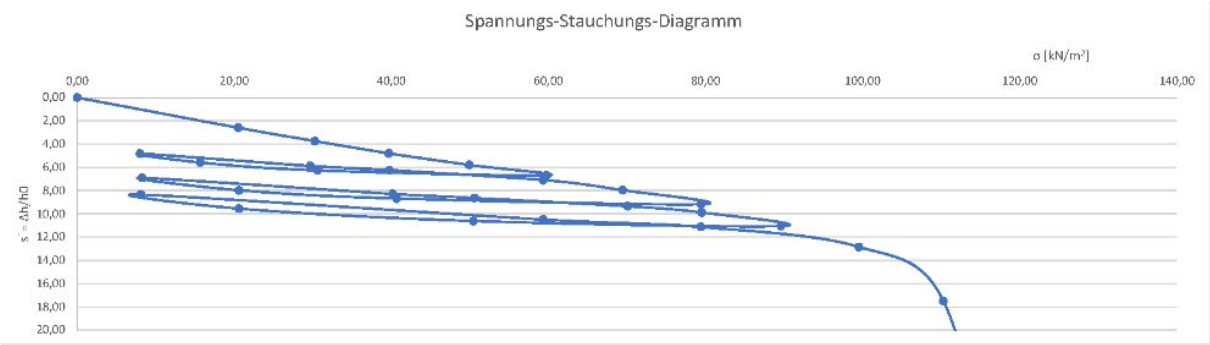


Abbildung 6-8: Spannungs-Stauchungs-Diagramm eines zyklischen Ödometerversuchs (eigene Darstellung)

In Tabelle 6-4 sind die Ergebnisse der Versuche zusammengefasst. Wie bereits erläutert, wurden die Versuche nach gesättigtem und ungesättigtem Zustand sowie nach der Art der Versuchsdurchführung gegliedert. Die ungesättigten Proben zeigen eine insgesamt um 50 bis 75 % höhere Steifigkeit im Vergleich zu den gesättigten Proben. Da das Material als Wasserspeicher dienen soll und somit vollgesättigte Zustände zu erwarten sind, sind die Versuchsergebnis für den gesättigten Zustand als Bemessungsgrundlage zu wählen.

Bei den gesättigten Versuchen zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Versuchsarten (mit und ohne seitliche Behinderung). Im ungesättigten Zustand hingegen weisen die Versuche mit seitlicher Behinderung eine durchschnittlich um ca. 28 % höhere Steifigkeit auf. Dieser Zusammenhang lässt sich möglicherweise auf das Belastungsniveau zurückführen, bei dem es zu einem seitlichen Ausweichen der Materialfasern kommt. Bei den gesättigten Versuchen beider Versuchsarten trat der Versagenszustands bereits bei einer Belastung zwischen 100 und 120 kN/m² ein. Im Gegensatz dazu zeigten die ungesättigten Proben eine höhere Belastbarkeit, und der Versagenszustand trat bei einer Spannung zwischen 120 und 160 kN/m² ein.

Die zyklischen Belastungen aus den Ödometerversuchen zeigen, dass die Steifigkeit des Materials nicht negativ beeinflusst wird. Im Gegenteil, mit zunehmender zyklischer Belastung nimmt die Steifigkeit durch die „Verdichtung“ der Fasern weiter zu. Wird jedoch das maximale Spannungsniveau erreicht, versagt die Faserstruktur, was zum Versagen des Materials führt. Dynamische Verkehrsbelastungen aus dem Straßenverkehr haben demnach, basierend auf den Ergebnissen der Ödometerversuche, keine nachteiligen Auswirkungen auf das Material. Allerdings muss sichergestellt werden, dass das maximale Spannungsniveau nicht überschritten wird, da sonst die Faserstruktur instabil wird und das Material versagt. Weiterhin ist zu beachten, dass das Material im

Betriebszustand einer erheblich großen Anzahl an Belastungszyklen ausgesetzt sein wird, als im Rahmen des Forschungsprojekts untersucht werden konnte.

Tabelle 6-3: Auswertungstabelle eines Ödometerversuchs (eigene Darstellung)

	Stufe	σ [kN/m²]	Setzung [mm]	s' =Δh/h0	h [mm]	E_s [MN/m²]
Erst-belastung	0	0,00	0,000	0,00	20,000	0,000
	1	20,50	0,517	2,59	19,483	0,793
	2	30,25	0,748	3,74	19,252	0,844
	3	39,67	0,957	4,79	19,043	0,901
	4	49,92	1,158	5,79	18,842	1,020
	5	59,75	1,338	6,69	18,662	1,093
Ent-lastung	6	30,58	1,251	6,26	18,749	6,705
	7	15,67	1,113	5,57	18,887	2,162
	8	8,00	0,964	4,82	19,036	1,029
Wieder-belastung	9	29,67	1,173	5,86	18,827	2,073
	10	39,75	1,247	6,23	18,753	2,725
	11	59,33	1,418	7,09	18,582	2,290
	12	69,42	1,590	7,95	18,410	1,172
	13	79,42	1,832	9,16	18,168	0,826
Ent-lastung	14	40,67	1,734	8,67	18,266	7,908
	15	20,58	1,594	7,97	18,406	2,869
	16	8,25	1,379	6,89	18,621	1,147
Wiederbelastung	17	40,17	1,656	8,28	18,344	2,304
	18	50,58	1,724	8,62	18,276	3,064
	19	70,08	1,867	9,33	18,133	2,727
	20	79,50	1,976	9,88	18,024	1,728
	21	89,58	2,208	11,04	17,792	0,869
Ent-lastung	22	50,42	2,122	10,61	17,878	9,109
	23	20,58	1,907	9,53	18,093	2,775
	24	8,08	1,666	8,33	18,334	1,037
Wieder-belastung	25	59,33	2,097	10,48	17,903	2,378
	26	79,42	2,224	11,12	17,776	3,163
	27	99,50	2,568	12,84	17,432	1,168
	28	110,25	3,497	17,48	16,503	0,231
	29	119,58	8,140	40,70	11,860	0,040

Tabelle 6-4: Auswertungsergebnisse der Ödometerversuche (eigene Darstellung)

Ödometerversuch				
Zustand	gesättigt	ungesättigt	gesättigt	ungesättigt
Versuchsart	ohne seitliche Behinderung		mit seitlicher Behinderung	
Steifenmodul [MN/m²]				
Mittelwert der zugrunde gelegten Versuche	2,2	2,8	2,2	3,9

Zur Nachvollziehbarkeit und einem besseren statisch-mechanischen Verständnis des BRS bzw. der durchgeführten Feldversuche wurde entschieden, ein FE-Modell des Systems mit Hilfe des Programms ANSYS zu generieren. Die Ergebnisse aus den zyklischen Ödometerversuchen an der Steinwolle konnten hierzu herangezogen werden, um entsprechende Materialparameter festzulegen. Im Rahmen der FE-Modellierung wurden unterschiedliche Stoffmodelle zur Modellierung des Spannungs-Dehnungs-verhaltens der Steinwolle untersucht. Als geeignetes Stoffmodell wurde schließlich ein hyperelastisches Modell 2. Ordnung (Ogden-Modell) der ANSYS-Materialbibliothek gewählt.

In Abbildung 6-9 sind die Validierungen der numerischen Ergebnisse für den ersten und zweiten Belastungsast eines Ödometerversuchs dargestellt. Es zeigt sich, dass sowohl der Erst- als auch der Wiederbelastungsast eine gute Übereinstimmung mit den numerischen Ergebnissen aufweisen. Der Bruchmechanismus konnte jedoch numerisch nicht abgebildet werden, da es sich bei dem ausgewählte Stoffmodell um ein elastisches Modell ohne Formulierung der Bruchbedingung handelt.

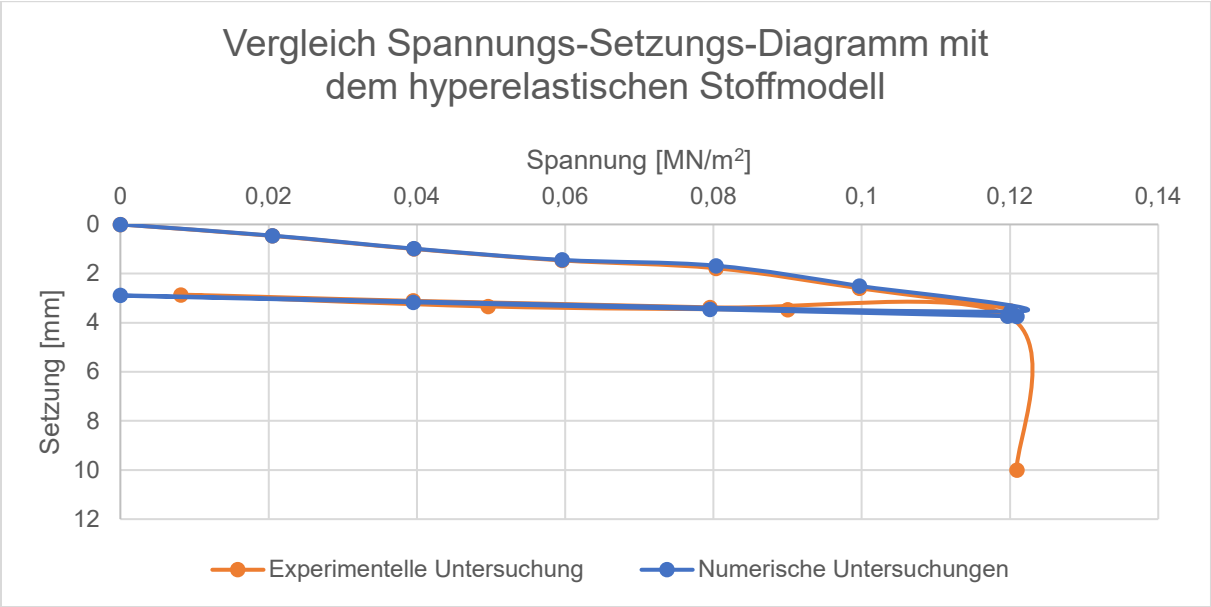


Abbildung 6-9: Validierung mit hyperelastischen Stoffmodell eines Ödometerversuchs (eigene Darstellung)

Neben den Ödometerversuchen im (small-scale-Versuche) wurden auch Untersuchungen des Unternehmens „Rockwool“ in die Modellierung einbezogen. Diese Untersuchungen

umfassten großskalierte Probekörper, die unter einaxialen Druckbelastungen getestet wurden. Ein besonderes Merkmal dieser large-scale-Versuche (Abbildung 6-10) besteht darin, dass die Steinwollelemente vergleichbar zu den Feldversuchen ebenfalls im Maßstab 1:1 untersucht worden sind. Anhand der Ergebnisse der large-scale-Versuche wurden ebenfalls Materialkennwerte für das verwendete hyperelastische Stoffmodell zurückgerechnet. Zusätzlich zu den large-scale-Versuchen wurden im Labor der Rockwool Einrichtungen einaxiale Druckversuche an Probewürfeln (middle-scale-Versuche) mit Kantenlängen von 150 mm × 150 mm durchgeführt.

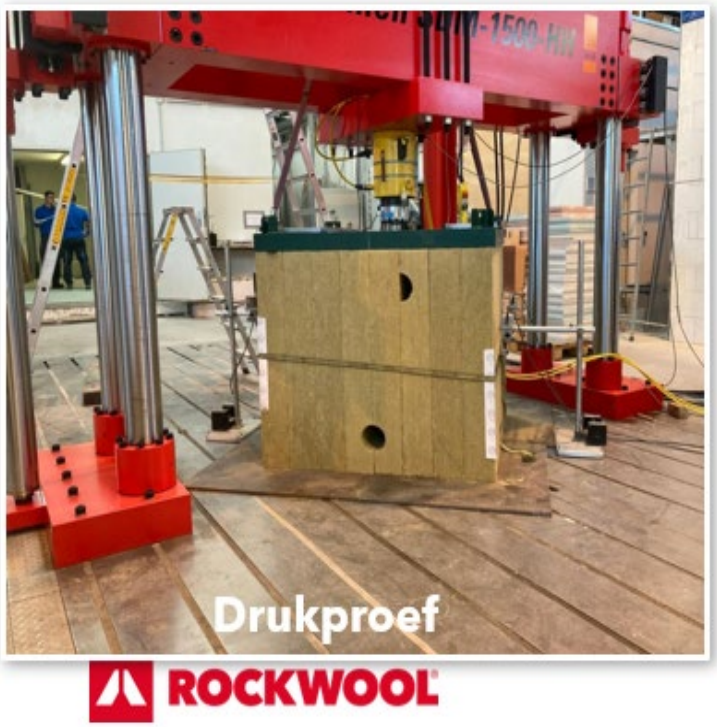


Abbildung 6-10: Großmodellversuch in Leipzig (Rockwool, 2024)

Das mechanische Verhalten der Steinwolle unterscheidet sich in Abhängigkeit des Versuchsmaßstabs. Grundsätzlich weist das Material ein besseres Verhalten auf, je weniger stark die Faserstruktur bei der Probenaufbereitung gestört wird. In den small-scale-Versuchen wurde die Steinwolle unter Anwendung kleinkalibriger Labortechniken geprüft. Die Steinwolle wird während der Herstellung in mehreren Schichten parallel zur Faser unter Einsatz eines hochkompressiblen Verfahrens produziert, wodurch das Material seine Widerstandsfähigkeit erlangt (Rockwool, 2024). Für die vorliegende Untersuchung wurden die Proben aus einem Element ausgeschnitten, wodurch es zu einer Störung der Faserstruktur gekommen ist. Nach der Entnahme mit einem Ausstechzylinder, wie in der Abbildung 6-11a) dargestellt, konnten sich die Fasern parallel entspannen und dadurch einen Teil ihrer ursprünglichen Widerstandsfähigkeit verlieren.

Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor ist, dass die Proben vor der Entnahme mit dem Ausstechzylinder (Abbildung 6-11b) entsprechend zugeschnitten wurden. Durch diesen Zuschnitt wurden die Fasern vom ursprünglichen Gefüge getrennt, wodurch die strukturelle Integrität der Proben weiter beeinträchtigt wird.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das geringste Spannungsniveau bis zum Versagenszustand in den small-scale-Versuchen auftritt, während das höchste Spannungsniveau in den large-scale-Versuchen erreicht werden kann.

Abbildung 6-11: Fehlerquellen bei der Probeentnahme (Seitenansicht a) Draufsicht b)) (eigene Darstellung)

Nachdem die Steifigkeit mithilfe der drei Prüfverfahren im Labor über das gewählte Stoffmodell bestimmt wurde, mussten anschließend die Bodenparameter der Stabilisierungsschicht erfasst werden. In der verfügbaren Materialbibliothek liegen keine geeigneten Materialkennwerte für das in der Stabilisierungsschicht verwendete Material vor. Für die Abschätzung der Bodenparameter wurde ebenfalls das hyperelastische Ogden-Modell zweiter Ordnung verwendet. Da Erfahrungswerte für die Anwendung hyperelastischer Stoffmodelle für Böden fehlen, wurden die Versuchsergebnisse der Feldversuche herangezogen, um die Materialsteifigkeit der Stabilisierungsschichten abzuschätzen.

Zur Abschätzung der Materialsteifigkeit wurden die Stabilisierungsschichten, wie in der Abbildung 6-12 dargestellt, identisch aufgebaut. Zunächst erfolgte eine Validierung der Versuchsergebnisse aus den Probefeldern mit einer Stabilisierungsschicht von 30 cm. In Arbeitspaket 4.3 wurden zwei Varianten von Steinwolle in unterschiedlichen Bereichen untersucht. Zunächst wurde der Erstbelastungsast des ersten Versuchs modelliert, Abbildung 6-12, links. In Abbildung 6-12, rechts ist der Wiederbelastungsast dargestellt. Die orange Kurve stellt jeweils die experimentellen Versuchsergebnisse und die blaue Kurve die numerischen Untersuchungsergebnisse dar.

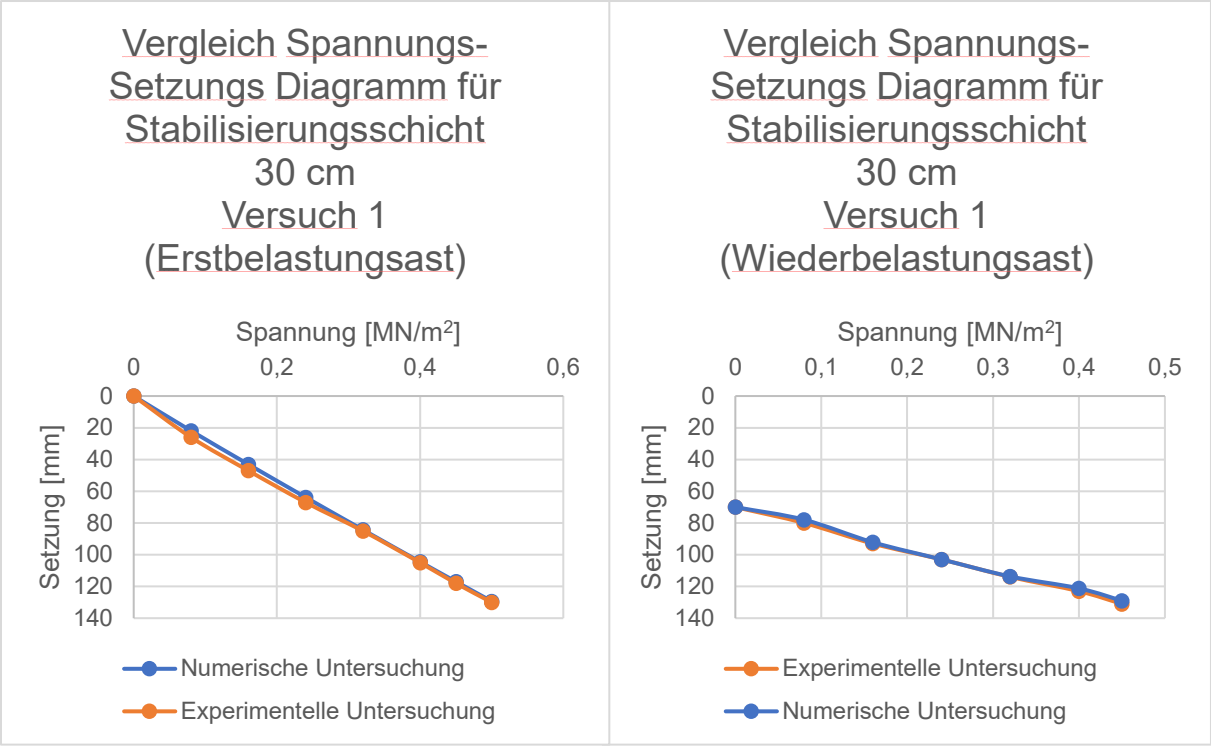


Abbildung 6-12: Vergleich Spannungs-Setzungs-Diagramm für den Erst- und Wiederbelastungsast (eigene Darstellung)

In Abbildung 6-13 wurde der Erstbelastungsast mit dem Wiederbelastungsast verknüpft, wobei der Beginn des Wiederbelastungsasts aus den experimentellen Versuchen übernommen wurde. Auch in diesem Fall zeigt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen den experimentellen Ergebnissen und der numerischen Analyse. Aufgrund der Zusammenführung beider Belastungsäste konnte der Entlastungsast nicht adäquat dargestellt werden.

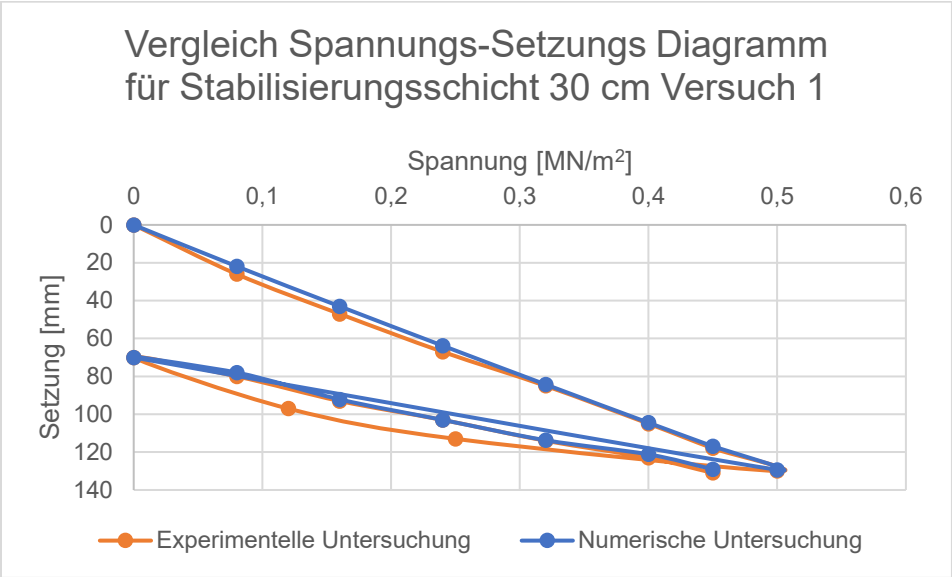


Abbildung 6-13: Vergleich des Spannungs-Setzungs-Diagramms für die Stabilisierungsschicht 30 cm Versuch 1 (eigene Darstellung)

Mithilfe der Rückrechnung konnte die Steifigkeit (Tabelle 6-5) des eingesetzten Überdeckungsmaterials zur Validierung des Systemverhaltens ermittelt werden. Als

Überdeckungsmaterial wurde Kalksteinschotter in der Körnung 0/45 mm verwendet und lagenweise eingebaut und verdichtet. Bei sehr guter Verdichtung liegen die Erfahrungswerte des Steifemoduls für ein solches Gemisch typischerweise in einer Größenordnung von 100 bis 200 MN/m². Der Vergleich mit den rückgerechneten Steifigkeiten des eingebauten Materials (Tabelle 6-5) verdeutlicht, dass diese Erfahrungswerte im Rahmen der Feldversuche z. T. offenbar nicht erreicht worden sind. Dies könnte auf eine unzureichende Verdichtung während der Einbauphase hinweisen.

Aus den FE-Berechnungen lässt sich jedoch ableiten, dass die durchschnittliche Steifigkeit des Stabilisierungsmaterials mit zunehmender Überdeckungsmächtigkeit zunimmt (mit Ausnahme der Schichtstärke von 125 cm). Insbesondere für geringe Überdeckungsmächtigkeiten ergeben sich verhältnismäßig geringe Steifemoduli aus der Rückrechnung. Hier liegt die Vermutung nahe, dass das Schottermaterial im unmittelbaren Überlagerungsbereich oberhalb der Steinwolle noch nicht ausreichend gut verdichtet werden kann. Die wieder abnehmende Steifigkeit des Schotters bei einer Überdeckungsmächtigkeit von 125 cm ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Oberfläche der Überdeckung unmittelbar vor der Durchführung der statischen Lastplattendruckversuche aufgelockert worden ist. Verglichen mit den Ergebnissen der Feldversuche fallen die rückgerechneten Steifigkeiten der Schottertragschicht zu gering aus. Zur Klärung bedarf es einer weitergehenden numerischen Betrachtung.

Tabelle 6-5: Rückrechnung der Steifigkeiten des HKS 0/45 (eigene Darstellung)

Überdeckungsmächtigkeit HKS 0/45 [cm]	Steifenmodul [MN/m²]
30	7,14
50	21,16
75	72,26
100	119,70
125	111,74

Geht man davon aus, dass bei einer Überdeckungsmächtigkeit von 75 cm (2,5-facher Durchmesser der Lastplatte) die Steinwolle nicht mehr im Lastausbreitungsbereich liegt und somit der Verformungsmodul ausschließlich aus dem Materialverhalten der Schottertragschicht resultiert, so ergibt sich anhand der empirischen Korrelationen der Tabelle 6-6 die Schlussfolgerung, dass der Schotter durchschnittlich mit einem Verdichtungsgrad von D_{pr} > 100 % eingebaut wurde. Bei einer geringeren Überdeckungsmächtigkeit ist anhand der gemessenen Verformungsmoduli E_{v2} und der Korrelation in Tabelle 6-6 davon auszugehen, dass nur geringere Verdichtungsgrade erzielt wurden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei einer Unterschreitung von ca. 60 cm (2-facher Durchmesser der Lastplatte) der negative Einfluss der Steinwolle auf den Verformungsmodul deutlich zunimmt.

Tabelle 6-6: Richtwerte für die Zuordnung der Verformungsmodul E_{v2} zum Verdichtungsgrad D_{Pr} (Strauß, 2018)

Bodengruppe DIN 18196	Verdichtungsgrad D_{Pr} [%]	Verformungsmodul E_{v2} [MN/m²]
GW, GI	≥ 100	≥ 100
	≥ 98	≥ 80
GE, SE SW, SI	≥ 100	≥ 80
	≥ 98	≥ 70
Gemischt- und feinkörnige Böden	≥ 100	≥ 45
	≥ 97	≥ 30
	≥ 95*	≥ 20*

* Werte gelten für Schutzwälle

In Abbildung 6-14 sind die Ergebnisse der statischen Lastplattendruckversuche 1 bis 4 zusammengefasst. Aufgrund der nur geringfügigen Abweichungen zwischen den zwei unterschiedlichen Steinwollvarianten wurden die Versuchsergebnisse gemeinsam in einem Diagramm dargestellt. Die numerischen Simulationen basieren auf den Ergebnissen der Steinwolle aus den large-scale Versuchen. Der rote Bereich im Diagramm zeigt, dass der Erstbelastungsast der FE-Berechnung im erwarteten Bereich der experimentellen Versuche liegt. Ebenso befindet sich der Wiederbelastungsast, dargestellt im dunkelblauen Bereich, ebenfalls innerhalb des erwarteten Bereichs. Insgesamt konnten die in-situ Feldversuche somit in guter Übereinstimmung mit dem gewählten Stoffgesetz für die Steinwolle und die Stabilisierungsschicht numerisch modelliert werden.

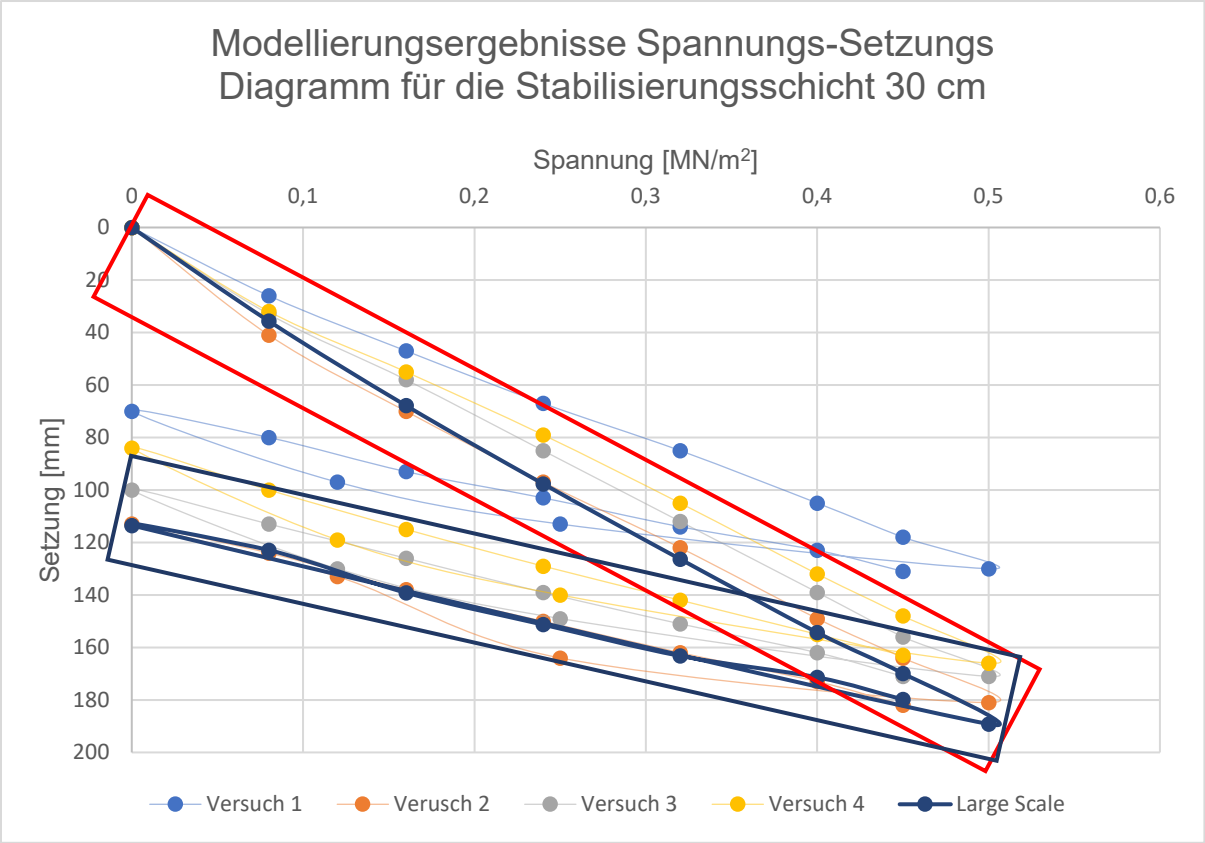


Abbildung 6-14: Vergleich der Modellierungsergebnisse mit den Versuchsergebnissen (eigene Darstellung)

7 Ökonomische Fragestellungen (AP 5)

Die Ziele von AP 5 bestanden darin, die übergeordnete Fragestellung „Wie können technisch mögliche, nachhaltig sinnvolle Projekte wie das BRS in der Praxis implementiert werden?“ zu beantworten.

Die folgenden Unterkapitel beschreiben die wesentlichen Bearbeitungsschritte und Ergebnisse jedes Teilarbeitspaketes:

- TAP 5.1: Kosten-Nutzen-Analysen
- TAP 5.2: Finanzierung
- TAP 5.3: Analyse der institutionellen Rahmenbedingungen

Die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes sowie die nachfolgende Ergebnisdarstellung erfolgte federführend am Lehrgebiet Infrastruktur und Netze (Prof. Dr. Mark Oelmann) der Hochschule Ruhr West.

7.1 Analyse der institutionellen Rahmenbedingungen (TAP 5.3)

Für die Beantwortung der übergeordneten Fragestellung ist für potentiell umsetzende Kommunen zunächst einmal entscheidend, welche Aufgaben auf einzelne Abteilungen zukommen und welche Risiken und Herausforderungen, aber ebenfalls auch welche Chancen mit so einem Projekt verknüpft sind. All dies ist Gegenstand des TAP 5.3: „Analyse der institutionellen Rahmenbedingungen“, das im Arbeitsplan zu BoRSiS zwar als drittes Arbeitspaket ausgewiesen war, mit dem sinnhafterweise aber das ökonomische Arbeitsfeld nun starten soll, weil es den ersten sich stellenden Fragenkomplex darstellt.

Im Rahmen dieses Teilarbeitspakets geht es um die folgenden Fragestellungen:

a) Welche gesetzlichen, technischen und sonstigen Rahmenbedingungen sind einzuhalten, wenn ein BRS eingeführt werden soll?

b) Welche Akteure werden gemeinhin benötigt, um ein BRS in der Praxis umzusetzen?

c) Worin werden die Chancen, aber auch die Herausforderungen im Zusammenhang mit der Einführung eines BRS gesehen?

d) Was sind Situationen, die die Einführung eines BRS insbesondere begünstigen? Lässt sich bereits „vorarbeiten“, um die Wahrscheinlichkeit eines reibungslosen Ablaufs zu erhöhen?

Hinsichtlich der Methodik ist zunächst in die sog. Neue Institutionenökonomik einzuführen, von der die Unterscheidung von Institutionen und Organisationen/ Akteuren entliehen wird. Daneben schließt sich eine Akteursanalyse an, für die ebenfalls knapp auf die wissenschaftlichen Grundlagen verwiesen wird.

Akteursanalysen dienen in der Politik und Organisationen zur verbesserten Planung und Umsetzung von Projekten (Grimble und Wellard, 1997). Die Akteure werden in Auftraggeber (Prinzipal) und Auftragnehmer (Agent) unterteilt, unter der Annahme, dass der Auftragnehmer gegenüber dem Auftraggeber über einen Wissensvorsprung verfügt (Prinzipal-Agent-Theorie). Ziel der Untersuchung kann sein, die Anreizstrukturen herauszuarbeiten, die eine Vorteilsnahme durch den Agenten gegenüber dem Prinzipal verhindert (siehe z. B. Blum et al. 2005, S. 155) und Verträge ökonomisch effizient zu gestalten (siehe z. B. Rogall 2006, S. 86). Für das vorliegende Projekt ist eine Akteursanalyse zum einen aufgrund der überlappenden Interessen der Akteure interessant und zum zweiten, weil Regenwasser als öffentliches Gut betrachtet wird, für dessen Bewirtschaftung aber nur wenige politische und wirtschaftliche Akteure verantwortlich sind (Gantner 2002, 68f).

7.1.1 Institutionen und Akteure

Ökonomisch wird zwischen Institutionen und Organisationen unterschieden. Institutionen stellen dabei die gesellschaftlichen Regelsysteme und Durchsetzungsmechanismen dar, unter denen Organisationen – im Weiteren auch als Akteure bezeichnet – handeln (Erlei et al. 2007, S. 23). Auf kommunaler Ebene sind die Akteure „Ämter und Behörden“ für die Umsetzung und Einhaltung der formellen Institutionen zuständig. Nicht selten werden so Institutionen mit den Spielregeln, Organisationen/ Akteure mit den Spielern in Bezug gesetzt.

Wie von Opper (2001, S. 605) beschrieben, werden Institutionen des Weiteren in formelle und informelle Regeln unterschieden. Erstere sind für unseren Themenkomplex etwa die gesetzlichen oder rechtlichen Rahmenbedingungen wie bspw. Wasserhaushaltsgesetz, DWA-Merkblätter, Entwässerungssatzungen oder kodifizierte Verfahrenshinweise einzelner beteiligter kommunaler Abteilungen. Letztere sind nicht kodifiziert und damit oft erheblich schwerer fassbar, aber mindestens genauso wichtig. Ein Beispiel hierfür ist die tradierte Norm, dass ein kommunales Amt sicherstellen möchte, dass es weiterhin in seinem Aufgabengebiet volle Entscheidungsautonomie hat und erst dann Mehraufwand auf sich nimmt, wenn auch die entsprechende Finanzierung einer Maßnahme bspw. des benötigten Personals gesichert ist. Gerade dieses Beispiel zeigt, dass es nicht unüblich ist, dass vor gegebenen formellen und informellen Institutionen, Organisationen/ Akteure „teils in Kooperation, teils in Konflikt mit anderen Individuen [Organisationen/ Akteuren, der Autor]“ agieren (Kirsch, 2004, S. 397).

Konkret werden nun zunächst die relevanten Institutionen (z. B. Rogall 2006, S. 85) vorgestellt. Im Anschluss werden die Akteure identifiziert und erläutert, welche Faktoren zu einer erfolgreichen Umsetzung beitragen bzw. an welchen Stellen spezifische Herausforderungen zu beachten sind.

7.1.2 Sichtung und Analyse der Institutionen (rechtliche und technische Rahmenbedingungen)

Die Implementierung des BRS erfordert eine umfassende Berücksichtigung sowohl rechtlicher als auch technischer Institutionen zur Bewirtschaftung und Versickerung von Niederschlagswasser. Da Wasser zumeist Landesrecht ist, würde es den Rahmen sprengen, wenn sämtliche Rahmenbedingungen aller Bundesländer und Kommunen aufgeführt würden. Die Aufstellung der formellen Institutionen erfolgt daher beispielhaft für Nordrhein-Westfalen. Die dort geltenden Regularien sind in Tabelle 7-1 aufgeführt.

Tabelle 7-1: Relevante Gesetzesvorgaben für das BRS

Institutionelle Ebene	Kurzbeschreibung
Bund	
Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	Gibt den auf Länderebene umzusetzenden Rechtsrahmen vor
Abwasserabgabengesetz (AbwAG)	Regelt die Erhebung sowie Verwendung der Abwasserabgabe auf Bundesebene
Land – hier NRW	
Landeswassergesetz (LWG)	Regelung zur „Beseitigung“ und Nutzung von Niederschlagswasser und dessen Finanzierung
Erlass zur Beseitigung von Niederschlagswasser	Spezifizierung der Regelungen des LWG
Abwasserabgabengesetz Nordrhein-Westfalen (AbwAG NRW)	Regelt die Erhebung sowie Verwendung der Abwasserabgabe in den Gemeinden
Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren	Festsetzung der Zuständigkeit und Behandlungspflicht bei Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren
Kommunalabgabengesetz für das Land Nordrhein-Westfalen (KAG)	Regelt u.a. die finanzielle Beteiligung von Anwohnern bei Straßensanierungsarbeiten in einer Kommune
Kommune	
Entwässerungssatzung	Regelt das Ableiten von Abwässern und dessen Finanzierung innerhalb einer Kommune
Abwassersatzung	In einigen Kommunen stellvertretend für die Entwässerungssatzung

Grundsätzlich soll Niederschlagswasser nach § 55 WHG und § 44 LWG NRW ortsnah versickert, verrieselt oder direkt in ein Gewässer eingeleitet werden, soweit dem keine rechtlichen oder wasserwirtschaftlichen Belange entgegenstehen. Für das BRS, bei dem Niederschlagswasser von Dachflächen sowie Niederschlagswasser von Straßenflächen eingeleitet und versickert wird, werden zwei Fragestellungen besonders relevant.

Für die Dachflächen ist es von entscheidender Bedeutung, ob das zu versickernde Wasser von privaten oder öffentlichen Flächen stammt. Die Einleitung von Niederschlagswasser von privaten Dachflächen in ein BRS auf öffentlichem Grund ist aufgrund des geltenden Anschluss- und Benutzungszwangs nur mit Nutzungsvereinbarungen gestattet. Beispielsweise können Sinkkästen als Übergabepunkte definiert werden. Die Kommune

kann in Zusammenarbeit mit der Unteren Wasserbehörde von der Abwasserbeseitigungspflicht befreit werden und ihrerseits den Nutzungsberechtigten des Grundstücks nach LWG NRW § 49 Abs. 4 von der Überlassungspflicht freistellen. Für NRW sind insbesondere § 4 Abs. 2 KAG NRW und § 6 KAG NRW in Bezug auf die Gebühren relevant. Weiterhin sind Wege- und Duldungsrechte vertraglich zu regeln, falls Niederschlagswasser über ein privates Grundstück einer Versickerungsanlage zugeführt werden soll. Aktuell entscheiden sich Kommunen deshalb überwiegend dazu, Baumrigolen und BRS über öffentliche Flächen zu beschicken.

Laut LWG NRW § 49 ist für die Beseitigung von Niederschlagswasser im Straßenraum der Straßenbaulastträger – in NRW somit die Kommune – zuständig. Allerdings steht es den Kommunen frei, dafür Dritte wie ein Abwasserentsorgungsunternehmen zu beauftragen. Die Abwassersatzungen der Gemeinden legen u. a. fest, ob die Entwässerung von Straßen und Grundstücken von einem kommunalen Träger durchgeführt wird oder ob dazu ein externes Unternehmen ermächtigt wurde. Für den Fall, dass Dritte beauftragt werden und daher auch für die Wartung der Entwässerungsanlage zuständig sind, bleibt die Anlage im Besitz der Kommune. In Bezug auf das BRS ist hier relevant, ob das System von den beteiligten Ämtern als Entwässerungsanlage eingeordnet wird.

Zusätzlich zu den rechtlichen Institutionen ergeben sich auch aus den technischen Rahmenbedingungen Anforderungen. Diese wurden wie folgt aufgeteilt:

- Anforderungen an den Boden
- Umgang mit Bestand
- Wasser: Stoffliche Belastung
- Wasser: Ableitung von öffentlichen oder privaten Flächen

Diese Punkte sind in Tabelle 7-2 aufgeführt.

Die Anforderungen zum Boden beinhalten die Bodenart, die Freiheit von Altlasten, den Grundwasserflurabstand sowie Anforderungen an die Tragfähigkeit des Bodens. Neben dem Merkblatt DWA-A 138-1 sind hier auch die Regeln der Technik des Straßenbaus maßgebend. Grundsätzlich ist ein Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis bei der jeweiligen unteren Wasserbehörde einzureichen. Für den Antrag wird ein Bodengutachten gefordert, welches häufig extern vergeben wird. Die Bodenschutzbehörde prüft grundsätzlich zusätzlich, ob etwaige Altlasten im Boden vorhanden sind.

In dicht besiedelten Gebieten lässt sich der Umgang mit dem Bestand in Bauplanungen häufig nicht vermeiden. Für den Abstand zu Bestandsgebäuden sind die Vorgaben des DWA-A 138-1 sowie landesspezifische Anforderungen zu beachten. Beispielsweise gelten in Nordrhein-Westfalen die Anforderungen gemäß des Ministerialerlasses zur Niederschlagswasserbeseitigung (gemäß §51a des Landeswassergesetz d. MURL vom 18. Mai 1998). Beim Umgang mit Bestandsleitungen werden einzelfallbezogene bilaterale Abmachungen, in Form von Planvereinbarungen, zwischen Abwasserentsorgern und den Energie-, Wasser- und Telekommunikationsversorgern getroffen. Die DIN 1998 zur Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Verkehrsflächen ist hier zentral

zu berücksichtigen. Für Bestandsbäume sind sowohl die Empfehlungen der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) als auch eventuelle zusätzliche Anforderungen der kommunalen Grünflächenämter einzuhalten. Für Bau- und Schutzmaßnahmen ist das DWA-M 162 zu beachten.

Tabelle 7-2: Relevante technische Rahmenbedingungen für das BRS

Technische Vorgabe	Rechtliche Grundlagen und Regelwerke	Adressat
Boden: Bodenart, Altlasten, Flurabstand, Tragfähigkeit	• DWA-A 138-1 • Regeln der Technik des Straßenbaus	Untere Wasserbehörde über Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis Genehmigung der Bodenschutzbehörde Bilaterale Abstimmungen (z.B. mit Leitungsträgern)
Umgang mit Bestand: Leitungen, Gebäude, Bäume	• DWA-A 138-1 • DWA-M 162 • DIN 1998:2018-07 • FLL Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 2 • FLL Empfehlungen zur Versickerung und Wasserrückhaltung • Länderspezifische Forderungen (z.B. Ministerialerlass zur Niederschlagswasserbeseitigung NRW)	
Wasser: Stoffliche Belastung	• DIN 1986-100:2016-12 • DWA-A 138-1 • DWA-A 102-2 • Länderspezifische Forderungen (z.B. Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren NRW)	
Wasser: Ableitung von öffentlichen oder privaten Flächen	• § 4 Abs. 2 und § 6 KAG NRW (Gebühren) • § 48 LWG NRW (Abwasserüberlassungspflicht)	

Den Ausgangspunkt für die stoffliche Anforderung an das zu versickernde Wasser stellt grundsätzlich die zu entwässernde Fläche und der damit verbundene implizite Verschmutzungsgrad des Niederschlagswassers dar. Das Arbeitsblatt DWA-A 138-1, das Anforderungen an Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser definiert, ist hier maßgebend. Die Reinigungsanforderungen orientieren sich am DWA-A 102. Für das BRS sind hier insbesondere für die Einleitung von Niederschlagswasser von Verkehrsflächen Vorreinigungen (vgl. TAP 2.2) vorzusehen. Niederschlagswasser von Dachflächen gilt zwar als eher gering belastet, das neue DWA-A 138-1 sieht aber auch hier eine Vorreinigung zumindest über die belebte Bodenzone vor.

7.1.3 Sichtung und Analyse der Organisationen/ Akteure

In der Planung und Umsetzung von blau-grünen Infrastrukturen ist eine Vielzahl verschiedener Akteure mit unterschiedlichen Beteiligungsrechten und Interessen involviert (Grimble und Wellard 1997, S. 177).

Exkurs: Teilarbeitspaketübergreifende Methodik / Umfrage und Experteninterviews

Aufgrund der engen Verzahnung der einzelnen Teilarbeitspakete im AP 5 und der bisher noch unzureichenden Dokumentation von Praxiserfahrungen wurde im Rahmen des Arbeitspakets eine qualitative Befragung zu Baumrigolen durchgeführt, um zusätzlich zu Gesprächen mit den Projektpartnern und Pilotkommunen auf weitere Informationen aus der – dem Projekt ähnlichen – Praxis zurückgreifen zu können. Inhalt dieser Interviews war zunächst das Gewinnen eines Eindrucks, welche Akteure an welchen Stellen und wann im Prozess involviert waren. Daneben wurden die Erfahrungen, welche bei der Planung und Errichtung von Baumrigolen gemacht wurden, zusammengetragen. Die Auswertung orientiert sich an der qualitativen Analyse von Texten nach Kuckartz (Kuckartz und Rädiker, 2022).

Interviewpartner waren vor allem Mitglieder des Expertennetzwerks Baumrigolen, welches zusammen mit der Zukunftsinitiative Klimawerk gegründet wurde, aber auch Vertreter:innen anderer bekannter Projekte der blau-grünen Infrastruktur. Insgesamt wurden neun Interviews geführt. Aussagen zu abgeschlossenen Projekten konnten nur in drei Fällen getroffen werden, in den übrigen Fällen waren der Planungs- oder Errichtungsprozess noch nicht abgeschlossen. Die Interviews wurden aufgezeichnet und anschließend wörtlich transkribiert. Die Ergebnisse der Befragung werden im weiteren Verlauf bei den entsprechenden Teilarbeitspaketen – wo jeweils passend – angeführt.

Daneben wurden Ende 2023 und Anfang 2024 vier jeweils rd. 1,5 Stunden dauernde Expertengespräche durchgeführt. Interviewt wurden zum einen in jeweils verantwortlicher Stellung Mitarbeitende der Praxispartner aus Leichlingen, Köln und Bochum. Zum zweiten wurden die Erfahrung der Stadtentwässerung Düsseldorf erfragt, um insbesondere die spezifischen Gründe zu erfahren, weswegen dort bislang von einer Umsetzung Abstand genommen wird.

Abbildung 7-1 zeigt die beteiligten Akteure und ordnet diese ihren Rollen im Abstimmungsprozess für eine Baumrigole zu. Die primären Akteure haben mehr Einfluss auf den Prozess als die sekundären Akteure. Die Ämter und Behörden sind zudem aufgrund ihrer Genehmigungskompetenz vetoberechtigt und können das Vorhaben ggf. stoppen, sollten z. B. bauliche Vorgaben nicht eingehalten werden.

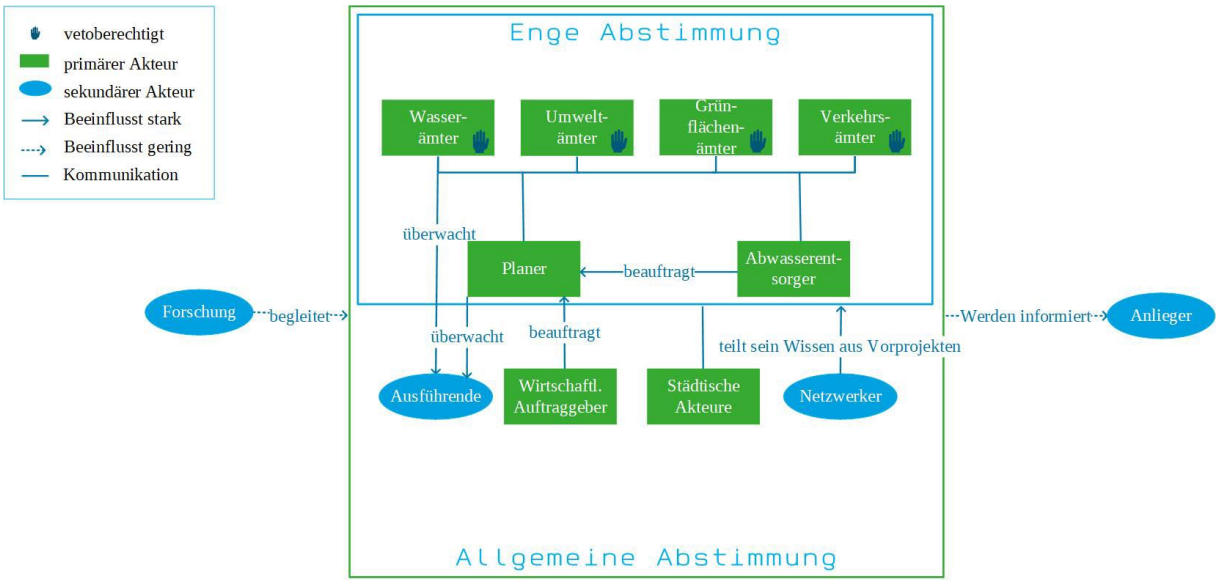


Abbildung 7-1: Querschnitt der Akteursstruktur im Abstimmungsprozess (Quelle: arbeitspaketübergreifende Befragung).

7.1.4 Förderliche und hemmende Faktoren

Im Rahmen der Interviews wurden Faktoren identifiziert, die die Entscheidung zum Bau einer Maßnahme beeinflussen können. Diese sind in Abbildung 7-2 dargestellt. Im besten Fall werden die genannten Faktoren von übergeordneten Akteuren aufgegriffen und weiterverfolgt (förderliche Faktoren) oder möglichst beseitigt (hemmende Faktoren). Es ist zu beachten, dass die Interviewten der Befragung Befürworter der Baumaßnahme waren. Es wird vermutet, dass u. a. der Aspekt der hohen Kosten deshalb seltener als erwartet genannt wurde.

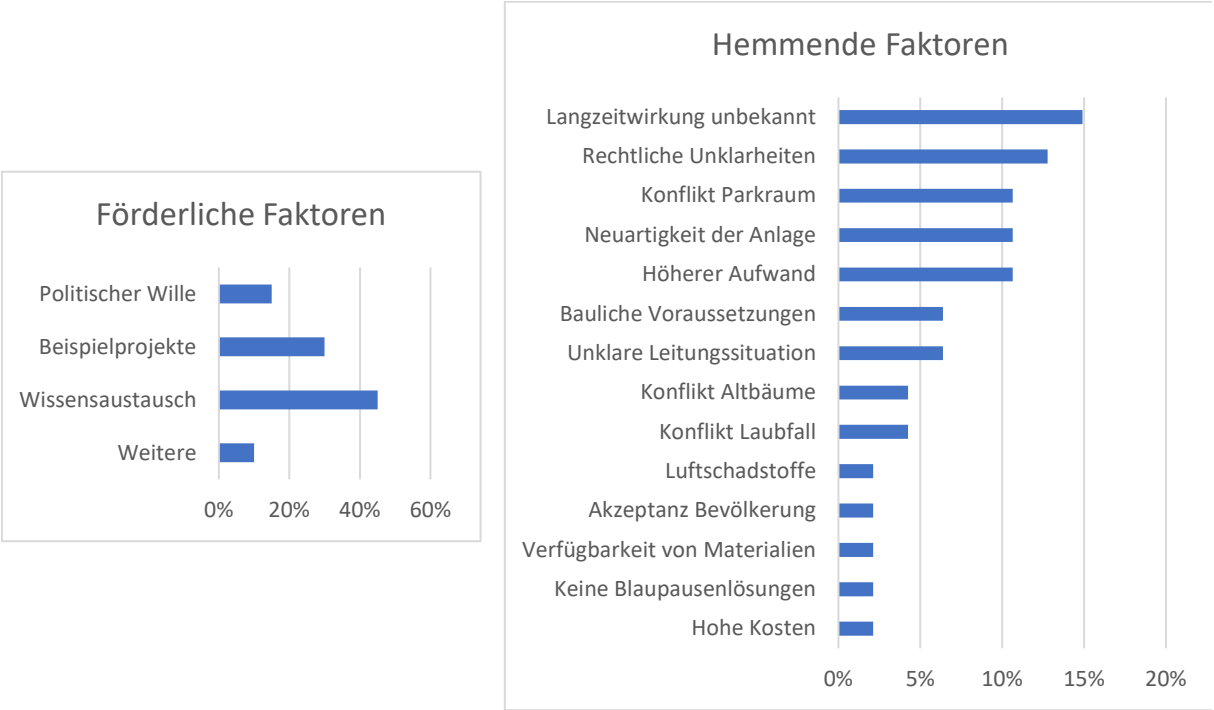


Abbildung 7-2: Als förderlich und hemmend empfundene Faktoren

Auf die abschließende Frage, was sich die Befragten für zukünftige Planungsprozesse wünschen, wurde u. a. bemerkt, dass rechtliche Vorgaben an den Stand der Technik angepasst werden sollten. Zudem wurden konkrete Planungshilfen gewünscht, beispielsweise Ausführungsvorschläge und Hinweise zu Hürden und Risiken, die auftretende Fragen im Planungsprozess beantworten helfen sollten.

Insbesondere aus den Experteninterviews ließ sich entnehmen, dass für umsetzungswillige Kommunen etwaige „Windows of Opportunity“ von großer Bedeutung sind. So kann die Umgestaltung einer Hauptverkehrsstraße einen Anknüpfungspunkt bilden, das BRS frühzeitig mitzudenken. Wenn ohnehin Baumaßnahmen im Straßenbereich oder an einem Kanal durchgeführt werden, können die Zusatzkosten für die Umsetzung des BRS signifikant reduziert werden. Ebenfalls lassen sich Synergien in der Kommunikation nutzen. Schließlich sind sowohl Kommune als auch Stadtentwässerer bestrebt, die Bevölkerung über ihre Aktivitäten zu unterrichten.

Ein weiteres „Window of Opportunity“ liegt auch in der Einflussnahme, wie Neubaugebiete geplant werden. In Bauleitplänen können durch Bau-, Rückbau- und Pflanzgebote (§§ 176, 179, 178 BauGB) Flächen für Bepflanzungen, beispielsweise durch Baumstandorte, vorgesehen werden, woran sich dann das BRS knüpfen ließe.

Die Pilotprojekte im Rahmen von BoRSiS offenbarten die Notwendigkeit, zwischen einzelnen Organisationen einer Kommune eng zusammenzuarbeiten. Hier haben kleinere Kommunen dann einen Vorteil, wenn vieles aus „einer Hand“ erfolgt. Leichlingen, eine der BoRSiS-Projektkommunen, ist derart aufgestellt, dass etwa sowohl das Grünflächenamt als auch die Bereitstellung der Abwasser-Dienstleitungen dem Umweltamt der Stadt unterstellt sind. Der Leiter des Umweltamtes kann – insbesondere bei guten Beziehungen zu den politischen Entscheidungsträgern der Stadt – etwaige unterschiedliche Vorstellungen in beiden Bereichen durch Moderation und ggfls. Anweisung relativ einfach lösen.

Etwas anders sieht dies in größeren Städten aus. Mehrere Dezernate sind hier beteiligt und angesichts der Vielfalt städtischer Ziele bedarf es bereits großer Überzeugungsarbeit, für Schwammstadtlösungen einen Konsens zu erzielen. Dies gilt insbesondere in Hinblick auf Flächennutzungskonflikte aufgrund des Ziels, bezahlbaren Wohnraum zu schaffen.

Als Best-Practice-Beispiel soll hier das Vorgehen der Stadt Bochum angeführt werden. Es setzt sehr unmittelbar auf den erfragten förderlichen und hemmenden Faktoren auf:

(1) In Bochum gab es das starke Commitment der Amtsleitung, Schwammstadtlösungen voranzutreiben.
(2) Erste Erfahrungen mit Baumrigolen-Lösungen wurden bereits gemacht. Rechtliche Interpretationsspielräume gab es auch hier. Angesichts der Situation, dass sich die einzelnen involvierten Personen bereits kannten und Zusammenarbeit eingeübt war, entschieden sich die Akteure, bewusst erste Erfahrungen gemeinsam machen zu wollen, anstatt sich bereits zu Beginn der Planung ausschließlich auf die Bedenken zu fokussieren. Dies gelang gut und nach mehreren Projekten mit Pilotcharakter können nun zunehmend die konkret gemachten Erfahrungen in Ablaufbeschreibungen kodifiziert werden. In der mittleren Frist entsteht so eine

größere Sicherheit für alle Beteiligten. Zukünftige Projekte können schneller, einvernehmlicher und effizienter abgearbeitet werden.

(3) Daneben zeigt Bochum ein Beispiel für ein zentrales „Window of Opportunity“. Die Castroper Straße sollte vor dem Hintergrund der Förderung des Fahrradverkehrs umgestaltet werden. Blau-grüne Infrastruktur ließ sich mit der Begründung der Nachhaltigkeitsförderung gut in das Vorhaben integrieren. Da die Umbaumaßnahme sowieso mit Tiefbauarbeiten verbunden war, konnten die Grenzkosten der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung deutlich reduziert werden.

(4) Langfristige Betriebserfahrungen mit dem BRS gibt es offensichtlich noch nicht. Zwar kann auf die gewonnenen Erkenntnisse in anderen europäischen Ländern, die auch für die Pilotkommunen zentral für die Umsetzung waren, zurückgegriffen werden und auch die im Projekt durchgeführten Untersuchungen zur Tragfähigkeit konnten Bedenken zu Projektbeginn entkräften. Weitere Erfahrungen im Betrieb zu sammeln, ist für die Umsetzung neuer Projekte dennoch von zentraler Bedeutung. Der Vorbehalt etwa, Wurzeleinwuchs in Muffen sei auch bei Gussrohren weiterhin zu befürchten, wie dies etwa seitens des Betriebspersonals der Stadtentwässerung Düsseldorf vorgebracht wurde, steht im Raum und lässt sich nur über die Zeit entkräften oder bestätigen.

Die förderlichen Rahmenbedingungen, die am häufigsten in der durchgeführten Umfrage benannt wurden, waren der politische Wille sowie der Wissensaustausch, also informelle Institutionen, die häufig auch auf zwischenmenschlichen Beziehungen beruhen. Bochum beispielsweise profitierte von dem großen Erfahrungsnetzwerk, das über mehrere Jahre hinweg aufgebaut wurde. Seit 2014 gibt es im erweiterten Ruhrgebiet ein Netzwerk (https://www.klima-werk.de/), das sich für die interkommunale Aufgabe, die Region blau-grüner und damit klimaresilienter zu machen, engagiert. In der Regel ein Mal pro Jahr gibt es ein großes Expert:innentreffen, dessen Ziel es ist, dass sich Vertretende der unterschiedlichen Kommunen kennenlernen und miteinander zu wasserrelevanten Themen in Austausch treten. In dieser Zeit wurden miteinander zahlreiche kleine und große Projekte verwirklicht, von denen viele im Rahmen dieser jährlichen Expert:innenforen angestoßen und auf den Weg gebracht wurden. Ziel dieser Initiative ist die Transformation der Region Schritt für Schritt zu einer „Schwammregion“ mit neuer Lebensqualität. Aus Sicht der Stadt Bochum war dieser immer wieder stattfindende Austausch sowohl mit Mitarbeitenden anderer Ämter der Stadt als auch mit anderen Städten die Grundbedingung für eine tendenziell positive Grundeinstellung zur Integration von Wasserthemen in gesamtstädtische Überlegungen.

7.2 Kosten-Nutzen-Analysen (TAP 5.1)

7.2.1 Grundsätzliche Methodik einer Kosten-Nutzen-Analyse

Für die Planung und Umsetzung von Systemen sind neben der technischen Machbarkeit vor allem auch ökonomische Aspekte für die entscheidungsberechtigten Akteure von Bedeutung (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) 2011, S. 240; Müller et al. 2023, S. 56). Welche Rolle diese ökonomischen Aspekte bei der Entscheidungsfindung spielen, hängt von der Einstellung der Akteure gegenüber dem System und den vorherrschenden institutionellen Rahmenbedingungen ab (siehe hierzu auch TAP 5.3). Zur Beurteilung der ökonomischen Aspekte werden oftmals Kosten-Nutzen-Analysen (KNA) herangezogen.

Eine KNA ist eine Methode zur systematischen Bewertung von Maßnahmen, bei der die Kosten und der daraus resultierende Nutzen bewertet und miteinander verglichen werden. Das Ziel besteht darin, den wirtschaftlichen Gesamtnutzen zu maximieren, indem solche Maßnahmen bevorzugt durchgeführt werden, bei denen der Nutzen höher ist als die Kosten. Dabei stellt die Quantifizierung des Nutzens eine zentrale Herausforderung dar, insbesondere weil viele Vorteile nicht direkt in monetären Einheiten messbar sind. Dies betrifft vor allem immaterielle und nicht-marktbezogene Nutzen, wie z. B. Umweltschutz, Klimaresilienz oder Biodiversität. Vor diesem Hintergrund wird zwischen qualitativen und quantitativen Ansätzen unterschieden, wobei zu betonen ist, dass sich beide Ansätze im Rahmen einer KNA ergänzen können. Eine qualitative Analyse bietet eine breitere Perspektive und hilft dabei, schwierig zu quantifizierende Aspekte dennoch zu berücksichtigen.

Demgegenüber liefern quantitative Ansätze mit monetarisierten Nutzenwerten eine präzisere Entscheidungsbasis, sofern die notwendigen Daten verfügbar sind oder sich zumindest mit ausreichender Genauigkeit schätzen lassen (Hanley and Spash, 1993). In diesem Zusammenhang wird häufig die sog. „Benefit Transfer Method“ angewandt, bei der ein Nutzentransfer vorgenommen wird, um den wirtschaftlichen Wert von Ökosystemdienstleistungen zu schätzen. Dazu werden verfügbare Informationen aus anderen Primärstudien übertragen, die an einem anderen Ort und/oder in einem anderen Kontext durchgeführt wurden. Der Nutzentransfer wird häufig angewandt, wenn es zu teuer ist und/oder zu wenig Zeit zur Verfügung steht, um eine komplett eigenständige Bewertungsstudie durchzuführen, aber dennoch ein monetärer Wert für den Nutzen benötigt wird. Es ist wichtig zu beachten, dass ein Nutzentransfer nur so genau sein kann, wie die ursprüngliche Studie. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass der Kontext der Originalstudie möglichst zu demjenigen Kontext des Betrachtungsgegenstands passt. In Tabelle 7-3 wird die Methodik einer KNA anhand eines wasserwirtschaftlichen Beispiels veranschaulicht.

Tabelle 7-3: Beispiel für eine Kosten-Nutzen-Analyse

Problem-stellung	Zur Vergrößerung der landwirtschaftlichen Flächen einer Region wurde ein Flussabschnitt stark begradigt. Dies hat zu einem erheblichen Verlust der Artenvielfalt, häufigeren Überschwemmungen und einer Verschlechterung der Wasserqualität geführt. Daher wird eine Renaturierung des Flussabschnitts diskutiert, die den ökologischen Zustand verbessern und Überschwemmungs-risiken reduzieren soll.
Kosten	Direkte Kosten: Planung und Durchführung der Renaturierung: 10 Mio. Euro. Anschließende Wartung und Pflege: 0,5 Mio. Euro p. a. (über 10 Jahre). Indirekte Kosten: Verlust landwirtschaftlicher Flächen: 5 Mio. Euro. Gesamtkosten: ca. 20 Mio. Euro (über 10 Jahre).
Nutzen	Quantitative Analyse (monetär bewertbarer Nutzen): Reduktion von Hochwasserschäden: Einsparung 2 Mio. Euro p. a. (über 10 Jahre). Verbesserte Wasserqualität, dadurch niedrigere Kosten für Trinkwasser-aufbereitung: 0,3 Mio. Euro p. a. (über 10 Jahre). Qualitative Analyse (Nicht-monetär bewertbarer Nutzen): Wiederherstellung von Lebensräumen und Erhöhung der Biodiversität. Erholungspotenziale für Bevölkerung (z. B. Angeln, Wandern oder Radfahren). Klimaschutzbeitrag (verbesserte Kohlenstoffbindung in naturnahen Gewässern).
Ergebnis der KNA	Quantitative Bewertung: Der monetär bewertbare Nutzen über 10 Jahre (23 Mio. Euro) übersteigt die Kosten (20 Mio. Euro), sodass ein Netto-Nutzen von 3 Mio. Euro resultiert. Qualitative Bewertung: Die zusätzlichen nicht-monetär bewertbaren Nutzen einer Renaturierung stärken die Argumentation für die Maßnahme. Das Beispiel zeigt, wie monetäre und nicht-monetäre Aspekte in einer KNA berücksichtigt werden können, um eine fundierte Grundlage für umweltpolitische Entscheidungen zu erstellen.

7.2.2 Anwendung der Kosten-Nutzen-Analyse auf das Boden-Rohr-System

In dem Projekt wurde eine KNA für ein BRS durchgeführt, deren Ergebnisse nachfolgend beschrieben werden. Die Analyse erfolgte anhand der folgenden Schritte:

(1) Bestimmung der (Mehr-) Kosten eines BRS im Vergleich zu einem herkömmlichen System

(2) Identifizierung positiver Auswirkungen eines BRS

(3) Analyse des Nutzens der positiven Auswirkungen

(4) Diskontierung von Kosten und Nutzen im Sinne einer dynamischen Investitionsrechnung sowie

(5) Gesamtbeurteilung.

(1) Bestimmung der (Mehr-) Kosten eines Boden-Rohr-Systems

Für die Kostenermittlung wurde ein **20 m langer Leitungsgraben mit einem Baumstandort** betrachtet. Da es sich bei der betrachteten Maßnahme um einen Neubau handelt, ist für das BRS zusätzlich eine Pflanzgrube mit einem Speicherelement für den Jungbaum zu berücksichtigen. Zur Ermittlung der Mengen und Kosten einzelner Positionen wurde der Standardquerschnitt herangezogen, wobei zu beachten ist, dass die Anforderungen im Einzelfall deutlich abweichen können. Da einige Positionen stark von der Einbautiefe abhängig sind, sind diese nicht im Vergleich aufgeführt. Die Kostenspannen ergeben sich aus Katalogen, ersten Leistungsverzeichnissen aus den Pilotkommunen und aus von Fachfirmen angeforderten Angeboten. Eine Übersicht ist in Tabelle 7-4 aufgeführt.

Tabelle 7-4: Ermittlung von Mengen und Kostenspannen einzelner Positionen als Grundlage der Kostenbestimmung

Position	Menge im Standardquerschnitt	Kostenspanne pro Mengeneinheit
Erdaushub	Projektspezifisch	60 – 105 €/m³
Einbau Bodenmaterial	Projektspezifisch	35 – 170 €/m³
Verbau	Projektspezifisch	7 – 30 €/m²
Gussrohre mit Verbindungen etc.	20 m plus Hausanschlüsse	290 €/m
Belüftungsvorrichtung	2 Stück	130 – 470 €/Stück
Schächte und Sonderschächte	Projektspezifisch, abhängig u.a. von der Anzahl der Straßenabläufe	3.870 – 4.150 €/Stück
Steinwolle inkl. Abdichtung	24 m³	225 – 250 €/m³
Geotextil	130 m² (abhängig von der Tiefe)	4 – 6 €/m²
Teilsickerrohr	20 m	35 – 65 €/m
grobkörniges Material	25 m³ (abhängig von der Tiefe)	60 €/m³
Baumsubstrat	0,75 m³ (abhängig von der Tiefe)	50 €/m³
Sand	19 m³	40 €/m³
Baumpflanzung	1 Stück	Keine Angabe, da große Schwankungen

Auf Basis der in Tabelle 7-4 dargestellten Mengen und Kostenspannen einzelner Positionen wurde im nächsten Schritt ermittelt, wie sich die Kosten zwischen einem herkömmlichen System und einem BRS voneinander unterscheiden. Die Berechnungen basieren einerseits auf den Mittelwerten der Kostenspannen aus Tabelle 7-4 und andererseits auf Ergebnissen bilateraler Interviews mit beteiligten Pilotkommunen zum Mengengerüst einzelner Positionen. Für den Kostenvergleich wurden weitere Annahmen zu den zuvor als „projektspezifisch“ deklarierten Positionen getroffen, um eine Indikation zu den unmittelbaren Mehrkosten eines BRS ableiten zu können. Der entsprechende Vergleich zwischen den beiden Systemen ist in Tabelle 7-5 aufgeführt.

Tabelle 7-5: Kostenvergleich zwischen herkömmlichem System und BRS

Position	**Herkömmliches System** (Annahmen: Rohrleitung aus Steinzeug; ein Baumstandort)	**Boden-Rohr-System**
Erdaushub	projektspezifisch; im Schnitt ca. 10 % weniger Erdaushub → Ersparnis von 285 €/lfd. m gegenüber BRS für Erdaushub, Einbau Bodenmaterial und Verbau → 285 €/m • 20 m = **5.700 €**	Projektspezifisch; s. Spalte links
Einbau Bodenmaterial	projektspezifisch; im Schnitt ca. 10 % geringere Kosten; bei BRS würde angabegemäß eine Erschwerniszulage in Ansatz gebracht → relative Ersparnis siehe Position „Erdaushub“	Projektspezifisch; s. Spalte links
Verbau	projektspezifisch; im Schnitt ca. 10 % geringere Kosten → relative Ersparnis siehe Position „Erdaushub“	Projektspezifisch; s. Spalte links
Rohre mit Verbindungen etc.	Steinzeugrohre: **2.900 €**	Gussrohre: **5.800 €**
Belüftungs-vorrichtung	Nicht notwendig	**600 €**
Schächte und Sonderschächte	projektspezifisch – grundsätzlich ist auf gerader Strecke lediglich ein Schacht von Nöten bei einer üblichen Haltungslänge von i.d.R. 50-60 m. Annahme hier: Kurve → 2 Schächte → 2 • 4.000=**8.000**	projektspezifisch – grundsätzlich sind neben den beiden klassischen Schächten zwei weitere für die Zuführung des Niederschlagswassers zu den Steinwolle-Elementen und als Beipassleitung im Falle von zu hohem Niederschlag notwendig → 4 • 4.000 € = **16.000 €**
Steinwolle	Nicht relevant	**6.000 €**
Geotextil	Nicht relevant	**630 €**
Teilsickerrohr	Nicht relevant	**1.000 €**
grobkörniges Material	Nicht relevant	**1.500 €**
Baumsubstrat	Nicht relevant	**35 €**
Sand	Annahme: Anstatt grobk. Material und Steinwolle wird Sand verfüllt → 68 m³ • 40 €/m³ = **2.720 €**	**770 €**

Wie in obiger Tabelle vermerkt, entstehen Mehrkosten beim BRS gegenüber dem herkömmlichen System vor allem durch höhere Materialkosten (insbesondere durch das duktile Gussrohr) sowie durch die zusätzlichen Kosten für die Steinwolle, das grobkörnige bzw. porenreiche Substrat, die Reinigungs- und Belüftungsvorrichtungen, die zusätzlich

benötigten Schächte sowie die relativ höheren Verbaukosten. Niedrigere Kosten beim BRS resultieren aus weniger Sand, der zur Verfüllung benötigt wird.

Ein Gesamtüberblick zu den Mehr- bzw. Minderkosten eines BRS im Vergleich zu einem herkömmlichen System wird für einzelnen Positionen in Tabelle 7-6 dargestellt. In der Summe ergeben sich für das BRS Mehrkosten von 1.220 € pro lfd. Meter. Die vielen hier getroffenen Annahmen fokussieren einen sehr konkreten Einzelfall. In Abhängigkeit anderer Rahmenparameter sind die Ergebnisse nicht unmittelbar übertragbar.

Von Bedeutung ist gemäß den Informationen der Pilotkommunen die längere Lebensdauer von duktilen Gussrohrkanälen im Gegensatz zu Steinzeugkanälen. Erstere werden über 100 Jahre, letztere über 71 Jahre abgeschrieben.

Tabelle 7-6: Mehr-/Minderkosten eines BRS im Vergleich zu einem herkömmlichen System

	Gesamtmehrkosten ggü. konventionellem System in €
Erdaushub	5.700
Einbau Bodenmaterial	
Verbau	
Rohre mit Verbindungen etc.	2.900
Belüftungs-vorrichtung	600
Schächte und Sonderschächte	8.000
Steinwolle	6.000
Geotextil	630
Teilsickerrohr	1.000
grobkörniges Material	1.500
Baumsubstrat	35
Sand	-1.950
Gesamtmehrkosten BRS bei 20 m Haltungslänge	**24.415**
Gesamtmehrkosten BRS pro lfd. Meter	1.220

In Bezug auf weitere betroffene Aufwandspositionen im Unterhalt kommt es möglicherweise wegen der vergrößerten Baumkrone bei dem BRS zu höheren Wartungskosten beim Baumschnitt und aufgrund eines höheren Laubanfalls zu einem höheren Reinigungsbedarf.

Kostenreduktionen im Vergleich zum herkömmlichen System sind hingegen bei der Bewässerung, bei der Beseitigung von Wurzelschäden im Gehwegsbereich und aufgrund der höheren Baumvitalität bei selteneren Ersatzpflanzungen zu erwarten. Die Rückmeldungen aus den Pilotkommunen legen den Schluss nahe, dass sich diese Mehr- bzw. Minderkosten bei den genannten Unterhaltspositionen zwischen den beiden Systemen gegenseitig kompensieren, sodass im Weiteren von (nahezu) identischen Unterhaltungskosten ausgegangen wird.

Für die Wartung der Steinwolle sollte eine Inspektion zwei Jahre nach dem Einbau sowie nach Starkregenereignissen erfolgen. Nach Erfahrungswerten liegt das Wartungs- und Inspektionsintervall unter Berücksichtigung von Starkregenereignissen bei zehn Jahren. Für eine Kostenschätzung wird vereinfachend ein Betrag von 1 €/m p. a. über die gesamte Nutzungsdauer angesetzt.

(2) Identifizierung positiver Auswirkungen eines Boden-Rohr-Systems

BRS zeichnen sich dadurch aus, dass die genutzten Leitungsgräben einen linienförmigen erweiterten Speicher für Niederschlagswasser ermöglichen und zugleich den Baumstandorten durch Verwendung von duktilen Gussrohren mehr Raum für ihre Wurzeln bieten. Im Hinblick auf die positiven Auswirkungen eines BRS lassen sich daher drei grundlegende Nutzenkategorien unterscheiden:

(A) Vergrößerter Speicherraum für Niederschlagswasser, das bei (Stark-) Regenereignissen zurückgehalten und ortsnah versickert wird bzw. Stadtbäumen über einen längeren Zeitraum, insb. während langanhaltender Trockenphasen, für Bewässerungszwecke zur Verfügung steht.

(B) Verbesserte Bedingungen für Stadtbäume durch die Erweiterung des Wurzelraums, was in Verbindung mit dem gespeicherten Niederschlagswasser das Wachstum, die Vitalität und die Lebenserwartung der Bäume begünstigt. Gleichzeitig wächst mit zunehmendem Wurzelwachstum auch das Kronenvolumen der Bäume, was sich positiv auf das Mikroklima, die Stadtbegrünung und die Aufenthaltsqualität auswirkt.

(C) Positive Aspekte durch Verwendung von duktilen Gussrohren im Vergleich zu herkömmlichen Abwasserrohren.

Die im Rahmen des Projekts identifizierten nutzenstiftenden Aspekte eines BRS werden nachfolgend den o. g. Nutzenkategorien zugeordnet.

(A) Vergrößerter Speicherraum für Niederschlagswasser

- Höhere Grundwasserneubildung
- Reduzierung von starkregenbedingten Überschwemmungen
- Verringerte Energiekosten in Kläranlagen durch geringere Abwassermengen (nur bei Mischkanalisationen)

(B) Verbesserte Bedingungen für Stadtbäume

- Längere Lebenserwartung der Stadtbäume (Reduktion von Neupflanzungen)
- Größeres Volumen der Baumkronen hat positive Auswirkungen auf:
  - Verdunstungs- und Kühlwirkung
  - Stoffrückhalt in der Luft
  - Bindung von Kohlenstoffdioxid
  - Artenvielfalt
  - Sozialökologische Wirkung
  - Aufenthaltsqualität
- Verringerte Wurzelschäden an Gehwegen durch vergrößerten Wurzelraum

(C) Verwendung von duktilen Gussrohren

- Verringerte Schadensquoten durch einwachsende Wurzeln
- Höhere Nutzungsdauer durch Verwendung von Gussrohren
- Ressourcenschonung durch kreislauffähige Werkstoffe

(3) Analyse des Nutzens der positiven Auswirkungen

Die o. g. nutzenstiftenden Aspekte eines BRS werden in den nachfolgenden Tabellen näher betrachtet und – soweit möglich – mit einem monetarisierten Nutzenwert versehen. Im Projekt wurden keine eigenen Primärerhebungen vorgenommen, vielmehr wurde auf Studien aus der (wasserwirtschaftlichen) Forschung Bezug genommen (sog. Benefit Transfer).

Tabelle 7-7: Analyse des Nutzens: (A) Vergrößerter Speicherraum für Niederschlagswasser

Nutzen	Beschreibung	Monetärer Nutzen
Höhere Grundwasserneubildung	BRS durch Einleitung des Niederschlagswassers eine Form der „Entsiegelung“	Kerngedanke: Künstliche Grundwasseranreicherung wird weniger nötig Annahmen: 80 % von 1 m NS pro m² und Jahr können durch 25 m³ Steinwollelemente gehalten werden → bei 1,20 €/m³ NW-Gebühr **→ 120,- € p. a.** **→ pro lfd. m 6,- € p. a.**
Reduzierung von Überschwemmungen	Im Fall von Starkniederschlägen kann NW eingespeichert werden	Annahmen: 10 % des Einspeicherungspotentials von 25 m³ bereits befüllt → mit 10 % Wahrscheinlichkeit führt Überflutungswasser zu Schaden; 1 vollgelaufener Keller mit einer durchschnittlichen Schadenshöhe von 5.000 € wird alle 10 Jahre vermieden **→ 500,- € p. a.** **→ pro lfd. m 25,- € p. a.**
Verringerte Energiekosten	Bei Einleitungen von NW in Trennkanalisation wird Wasser gemeinhin ohne Energieaufwand abgeleitet; in Mischwasserkanälen eingeleitetes NW läuft mit BRS nicht durch System inkl. Kläranlage	Annahmen: 50 % (Anteil Mischwasserkanälen an Gesamt), 10 % Energie- an Gesamtkosten; Niederschlagswassergebühr 1,20 €/m³; bei 100 m³ p.a. **→ 7,50 € p. a.** **→ pro lfd. m 0,40 € p. a.**

In Summe brächte das BRS in der Nutzenkategorie A gegenüber einem herkömmlichen System einen monetarisierten Nutzen von **627,50 € p. a.** Dies entspricht ca. 35,- €/lfd. m pro Jahr.

Tabelle 7-8: Analyse des Nutzens: (B) Verbesserte Bedingungen für Stadtbäume

Nutzen	Beschreibung	Monetärer Nutzen
Höhere Lebens-erwartung der Bäume	Durch die höhere Lebenserwartung der Bäume erhöht sich der Zyklus für eine Neupflanzung.	*Monetäre Bewertung grds. möglich* (Kosten für die Anpflanzung eines Straßenbaums nach Erfahrungen des bremischen Straßenbauamtes [inkl. zusätzlicher Tiefbaukosten aufgrund der im Untergrund vorhandenen Infrastrukturen wie Wasser-, Strom- und Gasleitungen] ca. 3.800,- €) (Welling et al., 2021) → Annahme; Lebensdauer des Baumes erhöht sich von 13 auf 26 Jahre (Skiera and Moll, 1992) **→ Ersparnis von 146,- € p. a.** **→ pro lfd. m 7,30 € p. a.**
Verdunstungs- und Kühlwirkung	• Bis zu 300 Liter/Tag und Baum. (Grüning et al., 2021) • Reduzierter Hitzestress (UTCI >32 °C) direkt unter Bäumen im Mittel um 160 h/a (maximal um 410 h/a) (Sieker et al., 2019) • Direkte Schattenkühlung unter Baum um 15,9-18,7 °C und Reduktion der Lufttemperatur auf 1,5 m Höhe um 1,5 °C morgens und nachmittags (Tan et al., 2015)	*Monetäre Bewertung nicht möglich* (Einige Studien benennen positive Effekte in Form geringerer Todesfälle durch Hitzestress; die monetäre Bewertung ist jedoch nicht seriös möglich. Darüber hinaus lässt sich argumentieren, dass durch Schattenwurf die Energienutzung in Gebäuden reduziert wird; das Ausmaß ist jedoch sehr individuell)
Stoffrückhalt Luft	• Reduktion NOx um 45 % und von O_3 um 55 % (Vergleich zw. baumbeeinflussten und nicht baumbeeinflussten Mess-punkten in Freiburg) (Matzarakis und Streiling, 2004) • Reduktion der Gesamt-schadstoffe um 10,6-13,7 g/a pro m² Blattwerk (Durchschnitt aus Untersuchungen in mehreren US-Großstädten) (Nowak, 2002)	*Monetäre Bewertung sehr schwierig* (mit Hilfe von i-Tree wurde für die ca. 7 Mio. Bäume in New York eine Verringerung von O_3 um 735 t/a ermittelt; der Nutzen wurde mit ca. 17 Mio. US-$/a angegeben [vermiedene Gesundheitskosten, verringerte Sterblichkeit und geringerer Verlust bei der Arbeitsproduktivität])
Bindung von CO_2	Speicherung von 1.470 kg CO_2 durch einen Baum über den	*Monetäre Bewertung grds. möglich* (unter Zuhilfenahme

	Durchschnitt seines Lebens (durchschnittlicher Baum im Untersuchungsgebiet Karlsruhe mit Masse von 834,5 kg und Kohlenstoffanteil von 48 %) (Kändler et al., 2011)	des aktuellen Zertifikatpreises im EU-CO_2-Emissionshandel möglich [im Nov. 2024: ca. 68 €/t]). Annahme: 15 kg mehr CO_2-Bindung **→ 1 € p. a.**
Artenvielfalt	Bäume erhöhen nachweislich die Artenvielfalt, insb. bei Kombination mehrerer Baumarten (Auswertung für Würzburg; Apr.-Okt. 2017) (Böll et al., 2019)	*Monetäre Bewertung nicht möglich*
Sozialökologische Wirkung	Positive Auswirkung auf (psychische) Gesundheit sowie Umweltbewusstsein und Naturerlebnis insbes. durch eine erhöhte Aufenthaltsqualität durch ein oberirdisches Einleiten von Wasser in BRS.	*Monetäre Bewertung nicht möglich* (Analysen zu Immobilienpreisen zeigen positiven Zusammenhang zw. Preis und Vorhandensein von Bäumen in der Straße; exakte Quantifizierung jedoch schwierig) (Soares et al., 2011)

In der Nutzenkategorie B ergibt sich ein monetarisierter Nutzen des BRS von **147 € p. a.** bzw. ca. 7,40 €/lfd. m pro Jahr. Die schwerer monetarisierbaren Positionen in obiger Tabelle dienen als Merkposten.

Tabelle 7-9: Analyse des Nutzens: (C) Verwendung von duktilen Gussrohren

Nutzen	Beschreibung	Monetärer Nutzen
Verringerte Schadensquoten	Beim konventionellen System wird alternativ Steinzeug oder Beton verbaut; Duktile Gussrohre führen zu geringeren Schäden an Kanalabschnitten und damit zu geringeren Reparaturkosten	Annahmen: Aus Daten von Pilotkommunen 1.110 € pro km Kanal p.a. Reparaturkosten; Duktile Gussrohre 70% weniger Schäden **→ Ersparnis von 15,50 € p.a.** **→ pro lfd. m 0,80 € p. a.**
Höhere Nutzungsdauern	Die Investitionskosten vermindern sich, sofern duktile Gussrohre über eine längere Frist abgeschrieben werden als altern. Material	Annahmen: Kanäle Steinzeug werden bei Pilotkommunen über 71 Jahre abgeschrieben; Gussrohr über 100 Jahre; dies wird in der dynamischen Kosten-Nutzen-Analyse berücksichtigt
Ressourcenschonung durch Kreislaufwirtschaft	Einbau von Gussrohren ist unter Gesamtnachhaltigkeits-gesichtspunkten preiswerter als Steinzeug- oder Betonrohre.	Quantifizierung der „Cradle-to-Cradle-Effekte“ nicht bekannt

In der Nutzenkategorie C ergibt sich ein monetarisierter Nutzen des BRS von **15,50 € p. a.** bzw. ca. 0,80 €/lfd. m pro Jahr. Die höheren Nutzungsdauer des BRS wird in der nachfolgenden Betrachtung berücksichtigt.

(4) Diskontierung von Kosten und Nutzen

Folgende Zwischenergebnisse lassen sich festhalten:

- In den drei Nutzenkategorien A bis C ergibt sich für das BRS ein **monetarisierter Gesamtnutzen von 790,- € pro Jahr**. Einzelne Nutzen ließen sich seriös nicht quantifizieren, weswegen jene 790,- € pro Jahr eine Untergrenze der Nutzen darstellt.
- Diesem Gesamtnutzen stehen gleichwohl Mehrkosten für das BRS im Vergleich zu einem herkömmlichen System gegenüber.
    - Die (einmaligen) Mehrkosten des BRS für die Anfangsinvestition betragen gemäß Tabelle 7-10 insgesamt **24.415,- €**.
    - Bei den Betriebskosten wurde angenommen, dass sich Mehr- bzw. Minderkosten beider Systeme bei den Unterhaltungskosten ausgleichen und daher lediglich die zusätzlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten für die Steinwolle des BRS von **20,- € pro Jahr** zu berücksichtigen sind.
- Die Abschreibungsdauern beider Systeme unterscheiden sich deutlich:
    - Das herkömmliche System hat eine Abschreibungsdauer von **71 Jahren**.
    - Das BRS hat eine Abschreibungsdauer von **100 Jahren**.

Für eine Kosten-Nutzen-Analyse sind darüber hinaus folgende Aspekte relevant:

- Für den Vergleich von Investitionen mit unterschiedlicher Laufzeit muss eine sog. Diskontierung vorgenommen werden. Dazu werden alle zukünftigen Zahlungen auf den heutigen Zeitpunkt umgerechnet, indem sie mit einem Diskontierungszinssatz abgezinst werden. Das Ergebnis ist der sog. Kapitalwert einer Investition; ein Wert größer 0 bedeutet im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse, dass die Summe der monetarisierten Nutzenwerte höher als die Gesamtkosten sind und die Investition lohnenswert ist.
- Als Diskontierungssatz wird nachfolgend ein Wert von **3,5 % p. a.** angenommen. Dies entspricht dem Monatsmittelwert über 30 Jahre (02/1995 bis 01/2025) für börsennotierte Bundeswertpapiere mit einer Restlaufzeit von 20 Jahren. Diese makroökonomische Zeitreihe wird monatlich von der Deutschen Bundesbank zur Verfügung gestellt. Festverzinsliche Wertpapiere werden mit einem festgelegten Zinssatz vergütet, haben eine feste Laufzeit und werden an der Börse gehandelt. Dank der erstklassigen Bonität der Bundesrepublik Deutschland als Emittentin bieten alle Bundeswertpapiere eine hohe Sicherheit. Vor diesem Hintergrund wird der o. g. Wert als Orientierungsgröße für den Diskontierungssatz herangezogen.
- Für die Inflationsrate wird ein Wert von **2,0 % p. a.** angenommen; dies entspricht dem mittelfristigen Ziel der Europäischen Zentralbank im gesamten Euroraum.
- Sowohl für die jährlichen Betriebskosten als auch für die jährlichen monetarisierten Nutzenwerte wird eine Steigerung gemäß der Inflationsrate angenommen. Bei den Betriebskosten leuchtet dies unmittelbar ein: Die Kosten steigen im Zeitablauf und zwar in Höhe der Inflation. Für die verschiedenen Nutzenausprägungen wird unterstellt, dass auch ihr jeweiliger monetärer Wert über die Zeit steigt und zwar ebenfalls in Höhe der Inflation.
- Gleichzeitig werden sowohl die Betriebskosten als auch die Nutzenwerte zu Zwecken der Vergleichbarkeit mit dem Diskontierungszinssatz abgezinst.

(5) Gesamtbewertung

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden zwei Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen durchgeführt.

1. Zeitraum von 71 Jahren (= Abschreibungsdauer des herkömmlichen Systems).

In diese Vergleichsrechnung fließen insgesamt vier Elemente ein:

a) Summe der diskontierten monetarisierten Nutzenwerte (Jahre 1 bis 71).

b) Summe der diskontierten Betriebskosten (Jahre 1 bis 71).

c) Restwert des BRS im Jahr 71 (lineare Abschreibung).

d) Einmalige Mehrkosten des BRS in Jahr 0.

Dazu werden für jedes der 71 Betrachtungsjahre die in nachfolgender Tabelle 7-10 benannten Parameter berechnet; die Tabelle zeigt beispielhaft Werte ausgewählter Jahre.

Tabelle 7-10: Berechnung der Parameter der Kosten-Nutzen-Analyse

Jahr	Nutzen (inflationiert)	Nutzen (diskontiert)	Betriebsk. (inflationiert)	Betriebsk. (diskontiert)	Restwert BRS (nominal)	Restwert BRS (diskontiert)
1	806 €	779 €	20 €	20 €	88.442 €	85.451 €
2	822 €	767 €	21 €	19 €	87.548 €	81.727 €
3	838 €	756 €	21 €	19 €	86.655 €	78.158 €
4	855 €	745 €	22 €	19 €	85.762 €	74.736 €
5	**872 €**	**734 €**	**22 €**	**19 €**	**84.868 €**	**71.457 €**
…						
71	3.223 €	280 €	82 €	7 €	25.907 €	2.252 €

Am Beispiel des fünften Betrachtungsjahres lässt sich die Berechnung der Parameter wie folgt erläutern:

- Der Nutzenwert steigt jährlich um 2,0 %: 790 € • $(1 + 2{,}0\ \%)^{5\ \text{Jahre}}$ = **872 €.**
- Der Nutzenwert ist zu diskontieren: 872 € • $(1 / (1 + 3{,}5\ \%)^{5\ \text{Jahre}})$ = **734 €.**
- Gleiches gilt für die Betriebskosten (Inflationierung + Diskontierung).
- Die Investitionskosten des BRS betragen 89.335 €. Bei einer Abschreibungsdauer von 100 Jahren und linearer Abschreibung resultiert im fünften Jahr ein nominaler Restwert von **84.868 €.**
- Dieser Restwert ist zu diskontieren: 84.868 € • $(1 / (1 + 3{,}5\ \%)^{5\ \text{Jahre}})$ = **71.457 €.**

Vor diesem Hintergrund resultieren für die oben genannten Elemente die in Tabelle 7-11 dargestellten Werte. Bei einer Inflationsrate von 2,0 % und einem Diskontierungssatz von 3,5 % ist das BRS als vorteilhaft zu bewerten.

Tabelle 7-11: Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse (Zeitraum = 71 Jahre)

Parameter	Wert
Summe der monetarisierten Nutzenwerte (inflationiert und diskontiert)	+34.666 €
Summe der Betriebskosten (inflationiert und diskontiert)	-878 €
Restwert des BRS im Jahr 71 (diskontiert)	+2.252 €
Mehrkosten des BRS im Jahr 0	-24.415 €
Ergebnis für das BRS	**11.626 €**

Um abweichende Werte für die Inflationsrate bzw. den Diskontierungssatz zu berücksichtigen, wurden insgesamt neun verschiedene Szenarien betrachtet. Dabei wurden für die Inflationsrate bzw. den Diskontierungsfaktor jeweils Werte unterstellt, die um 1 %-Punkt höher bzw. niedriger als der Ursprungswert lagen. Tabelle 7-12 zeigt die neun Szenarien und die jeweiligen Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse. Daraus lässt sich ablesen, dass die Investition in ein BRS umso vorteilhafter ist, je höher die Inflationsrate bzw. je geringer der Diskontierungssatz ist. Dies lässt sich wie folgt erklären:

- Bei einer höheren Inflationsrate steigt zwar die Summe der Betriebskosten über den gesamten Zeitraum (negativer Effekt), gleichzeitig steigt jedoch auch die Summe der monetarisierten Nutzenwerte (positiver Effekt). Da der monetarisierte

Nutzenwert mit 790,- € im Ausgangsjahr jedoch deutlich höher ist als die Betriebskosten von 20,- €, überwiegt der positive Effekt deutlich.

- Bei einem höheren Diskontierungssatz fallen die Opportunitätskosten einer alternativen Geldanlage stärker ins Gewicht. Daher sind die jährlichen monetarisierten Nutzenwerte durch das BRS bezogen auf das Ausgangsjahr (d. h. nach Diskontierung) weniger wert.

Tabelle 7-12: Betrachtung unterschiedlicher Szenarien (Zeitraum = 71 Jahre)

Inflationsrate	Diskontierungsrate		
	2,5 %	3,5 %	4,5 %
1,0 %	+13.700 €	+3.500 €	-3.000 €
2,0 %	+26.100 €	+11.600 €	+2.500 €
3,0 %	+45.500 €	+24.000 €	+10.700 €

In den allermeisten Kombinationen ergibt sich folglich eine Vorteilhaftigkeit des BRS über die Zeit.

2. Zeitraum von 100 Jahren (= Abschreibungsdauer des BRS).

In einer zweiten Vergleichsrechnung für einen Zeitraum von 100 Jahren fließen insgesamt fünf Elemente ein:

a) Summe der diskontierten monetarisierten Nutzenwerte (Jahre 1 bis 100).
b) Summe der diskontierten Betriebskosten (Jahre 1 bis 100).
c) Neuinvestition für ein herkömmliches System im Jahr 72.
d) Restwert des (im 72. Jahr neu errichteten) herkömmlichen System im Jahr 100.
e) Einmalige Mehrkosten des BRS im Jahr 0.

Vor diesem Hintergrund resultieren für die oben genannten Elemente die in Tabelle 7-13 dargestellten Werte.

Tabelle 7-13: Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse (Zeitraum = 100 Jahre)

Parameter	Wert
Summe der monetarisierten Nutzenwerte (inflationiert und diskontiert)	+41243 €
Summe der Betriebskosten (inflationiert und diskontiert)	-1.044 €
Neuinvestition herk. System im Jahr 71 (inflationiert und diskontiert)	-23.026 €
Restwert des herk. Systems im Jahr 100 (diskontiert)	+5.023 €
Mehrkosten des BRS im Jahr 0	-24.415 €
Ergebnis für das BRS	**-2.220 €**

Es zeigt sich, dass das BRS bei einer Inflationsrate von 2,0 % und einem Diskontierungssatz von 3,5 % nicht als vorteilhaft zu bewerten ist, wenn ein sehr langer Betrachtungszeitraum von 100 Jahren unterstellt wird.

Auch für diese Vergleichsrechnung wurden abweichende Werte für die Inflationsrate bzw. den Diskontierungssatz berücksichtigt und insgesamt neun verschiedene Szenarien betrachtet. Tabelle 7-14 zeigt neun Szenarien und die jeweiligen Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse. Daraus wird deutlich, dass sich nur in drei von neun Szenarien ein positiver Kapitalwert ergibt. Gleichzeitig lässt sich anmerken, dass ein Betrachtungszeitraum von 100 Jahren als unrealistisch für eine derartige Investitionsentscheidung angesehen werden kann.

Tabelle 7-14: Betrachtung unterschiedlicher Szenarien (Zeitraum = 100 Jahre)

Inflationsrate	Diskontierungsrate		
	2,5 %	3,5 %	4,5 %
1,0 %	-600 €	-4.900 €	-7.800 €
2,0 %	+3.700 €	-2.200 €	-5.500 €
3,0 %	+9.800 €	+500 €	-3.400 €

7.3 Finanzierung (TAP 5.2)

Die Auseinandersetzung mit den Finanzierungsfragen setzt auf der Analyse der institutionellen Rahmenbedingungen inkl. der Akteursanalyse sowie der Nutzenanalyse auf. Beide werden benötigt, um die Kosten sachgerecht auf Akteure zuzuordnen. Die Nutzen bilden den Ausgangspunkt für den ersten Ansatz einer Kostenallokation, die involvierten Akteure den zweiten.

Der auf wettbewerblichen Märkten übliche Ansatz, dass Anbietende Preise für Leistungen in einer Höhe bestimmen, die den Zahlungsbereitschaften der Kunden und der relativen Wettbewerbssituation Rechnung tragen, ist hier nicht sachgerecht. Die Stadtentwässerung wird durch ein sog. Regulierungsbedürftiges natürliches Monopol erbracht, da dieses subadditive und irreversible Kosten aufweist. Volkswirtschaftlich und gesamtgesellschaftlich ist es wünschenswert, wenn wir in einer Region auch nur ein Unternehmen haben, das für die Stadtentwässerung zuständig ist (Oelmann, 2019). Damit dieses dann aber seine Monopolmacht nicht zu Ungunsten der Bürgerinnen und Bürger, oder allgemein der Nutzenden, ausnutzt, ist eine ex-ante oder ex-post Entgelthöhen- und Entgeltstrukturüberprüfung üblich (Knieps, 2008). Der Ausgangspunkt ist damit nahezu immer die Kostenbetrachtung, die vor- oder nachgelagert – wie gleich zu zeigen ist – erfolgen kann. Selbst ein „Revenue-Minus-Ansatz“, der in der Bestimmung von Durchleitungsentgelten in regulierten Netzsektoren ebenfalls ein gebräuchlicher Ansatz ist, lässt sich ebenfalls im Kern auf eine Kostenbetrachtung zurückführen.

7.3.1 Finanzierung in Abhängigkeit der Nutzen

Ein erster Orientierungspunkt für die Finanzierung ist die Frage nach den Profiteuren der Anlage. Hier ist zunächst angesprochen, wem direkter Nutzen zuzuordnen ist. Bei der

Entwässerung öffentlicher kommunaler Plätze durch ein BRS würden die Kosten in diesem Fall durch den kommunalen Haushalt finanziert, weil von der Entwässerungsdienstleistung die Kommune unmittelbar profitiert. Bei der Entwässerung privater Dachflächen würde dies über die Niederschlagswassergebühr erfolgen, da für den Endkunden eine unmittelbare Dienstleistung erbracht wird. Für den Kunden ist sie analog zu einer Ableitung in den Kanal zu sehen.

Daneben bringt das BRS aber auch weitere Nutzen mit sich, die nicht so unmittelbar einem spezifizierbaren Individuum zurechenbar sind. Wir sprechen hier von positiven externen Effekten (Fritsch, 2014), die im Vergleich zu herkömmlichen Systemen der Niederschlagsentwässerung auftreten.

Mit diesen positiven externen Effekten verändert sich die Struktur der verschiedenen profitierenden Stakeholder. Solche Effekte sind etwa die Kühlwirkung sowie die Verbesserung des Mikroklimas aufgrund der größeren Baumkronen. Auch die Aufenthaltsqualität in der Kommune mögen imposantere Baumkronen positiv beeinflussen. Dies alles kommt der Gesamtheit der Bürger zu Gute. Entsprechend wäre ökonomisch ein solcher Kostenanteil über den städtischen Haushalt zu finanzieren. Ebenfalls einen nicht unmittelbar Einzelnen zuordbarer Nutzen stellt der Wasserrückhalt durch die Steinwolle-Elemente dar. Niederschlagswasser lässt sich hier zwischenspeichern, der andernfalls über den Kanal abgeleitet würde. Gerade bei Starkniederschlägen wird so relativ die Überflutungswahrscheinlichkeit und -intensität vermindert. De facto wäre das BRS damit eine Maßnahme der dezentralen Niederschlagsentwässerung und würde – gerade in Regionen mit Wasserdargebotsproblemen – dazu beitragen, Wasser im Raum zu halten, ein erklärtes Ziel auch der Nationalen Wasserstrategie. Die Erbringung der notwendigen Maßnahmen sollte hier seitens des für die Stadtentwässerung Zuständigen durchgeführt werden. In Abhängigkeit des satzungsgemäßen Zwecks wird dies oft, aber nicht notwendigerweise immer der Abwasserentsorger sein. Sollten Private auf ihren Grundstücken die investiven Vorkehrungen treffen sowie die Betriebskosten tragen, ist wie auch bei anderen Maßnahmen der dezentralen Niederschlagsentwässerung eine (teilweise) Befreiung von den Niederschlagswasserentgelten für diesen Anteil etwa der versiegelten Dachfläche nicht unüblich (Oelmann und Roters, 2021a, 2021b). Die Begründung wäre, dass der private Eigentümer Aufwendungen trägt, die einen externen positiven Nutzen für alle anderen Bürgerinnen und Bürger in der Kommune schafft.

Diese Zuteilung der Finanzierungslast auf die jeweiligen Profiteure setzt in seiner Reinform sowohl die Monetarisierung der verschiedenen, möglicherweise auch schwer zu quantifizierenden Nutzenkomponenten sowie eine komplexe Kostenrechnung voraus. Die Frage ist zu beantworten, welcher abdiskontierte Teil der Investitionskosten sowie der Betriebskosten, auf welche Nutzergruppe entfällt. In der Praxis ist dies durchaus herausfordernd.

Festzuhalten aber bleibt zum einen, dass eine Teilfinanzierung entweder über öffentliche Haushalte oder aber Subventionen angesichts des externen positiven Nutzens begründbar ist. Zum zweiten muss der Träger der öffentlichen Straßen, Wege und Plätze – also entweder die Gemeinde, der Landkreis, das Land oder der Bund - für deren Entwässerung

zahlen. Die Kosten für die Ableitung des Oberflächenwassers von öffentlichen Grundstücks- und Verkehrsflächen dürfen gem. dem Urteil des OVG Niedersachen (Beschl. v. 26.11.2008, Az.: 9 LA 348/07) nicht den Grundstückseigentümern über die Niederschlagswassergebühren auferlegt werden. Die Kosten für die Straßenentwässerung werden demnach wohl in die Gebührenkalkulation einbezogen, aber der öffentliche Träger trägt den Kostenanteil, der auf die Entwässerung seiner Grundstücks- und Verkehrsflächen entfällt.

Eine andere Art, Finanzierungskosten zuzuordnen, ergibt sich aus der Festlegung, welche Funktion das BRS primär verfolgt. Diese Herangehensweise ist vergleichsweise pragmatisch und ist die seitens der Pilotkommunen – jeweils unterschiedlich interpretierte – Handlungsweise.

7.3.2 Finanzierung nach Art der Anlage

Im Gespräch mit den Pilotkommunen hat sich herausgestellt, dass die zentrale Frage darin gesehen wird, welche zentrale Funktion das BRS im Einzelfall zu erfüllen hat. Dies hilft abzuleiten, welcher Akteur für die Finanzierung welcher Anlagenteile zuständig ist. Im Wesentlichen gibt es drei Möglichkeiten, ein BRS einzuordnen: Es kann entweder als Entwässerungsanlage, als hydrologisch optimierter Baumstandort oder als Klimaanpassungsmaßnahme deklariert sein.

Das Landeswassergesetz NRW (§54) ermöglicht, dass öffentliche Regenwasserbewirtschaftungsanlagen als Teil des Entwässerungssystems aus dem Abwassergebührenaufkommen finanziert werden. Wird das BRS als Entwässerungsanlage definiert, können die Leistungen zur Pflege des Baumes an Dritte (beispielsweise Grünflächenämter, private Garten- und Landschaftsbauunternehmen) vergeben werden, welche aus dem Gebührenaufkommen zu finanzieren sind (LANUV NRW, 2022, S. 37). Wird das BRS als hydrologisch optimierter Baumstandort eingestuft, obliegt die Finanzierung dem Grünflächenamt oder das BRS ist im Rahmen einer Straßenbaumaßnahme zu finanzieren.

Eine Definition als Klimaanpassungsmaßnahme nach Bundes-Klimaanpassungsgesetz (KAnG) bedeutet eine Finanzierung über den Kommunalen Haushalt oder Fördermittel und ermöglicht in NRW die Finanzierung (insbesondere der Kapitalkosten) über die Abwassergebühr und hier insbesondere über die Niederschlagswassergebühr (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), §54, 7). Aller Voraussicht nach wird sich die Deklaration des BRS als Entwässerungsanlage und damit die Refinanzierung der Kosten über die Niederschlagswassergebühren als Regelfall der Finanzierung herausbilden. Die Darstellung der konkreten Herangehensweise der Pilotkommunen zeigt gleichwohl eine gewisse Spannbreite.

7.3.3 Kostenaufteilung in den Pilotkommunen

Sowohl in der Befragung als auch in den Interviews wurde die große Heterogenität in den Organisationsstrukturen der Kommunen deutlich. In Abbildung 7-3 werden die Aufteilungen und Zuständigkeiten in Bochum und Leichlingen schematisch einander gegenübergestellt.

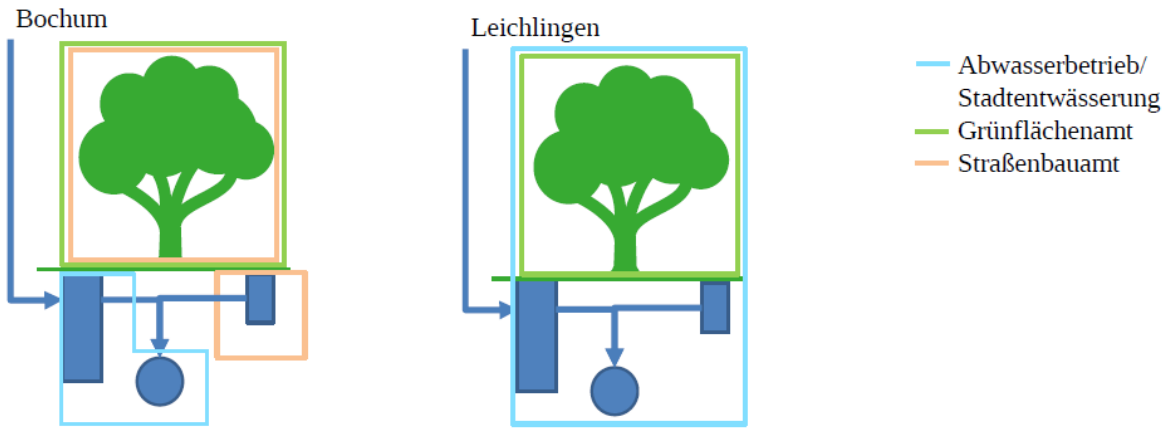


Abbildung 7-3: Mögliche Aufteilung der Betriebskosten und Zuständigkeiten

In Bochum wurden anhand von verschiedenen pilothaften Baumrigolenprojekten Erfahrungen zu möglichen Kostenaufteilungen zwischen den Akteuren gemacht, die mittelfristig kodifiziert werden sollen. Beispielsweise wurde im Rahmen von Pilotprojekten von der Stadtentwässerung angeboten, bei Schadensfällen die Baumneupflanzung zu übernehmen, um die anderen beteiligten Akteure zu überzeugen. Eine bewährte Aufteilung ist, dass das Straßenbauamt die Investitionskosten für den Baum trägt und die Pflegekosten anschließend vom Grünflächenamt übernommen werden. Die Zuständigkeiten für die unterirdischen Anlagen (Schächte und Rohrleitungen) liegen bei der Entwässerungsabteilung, während die Straßenabläufe in der Zuständigkeit des Straßenbauamts liegen. Da es sich um eine technische Anlage handelt, erfolgt die Finanzierung der Planung der Anlage über Abwassergebühren. Fördermittel werden bei Bedarf beantragt und genutzt.

In Leichlingen wird das gesamte BRS einschließlich des Baums als Entwässerungsanlage definiert und über Abwassergebühren finanziert. Die Wartung der Anlage liegt in der Verantwortung des Abwasserbetriebs. Der Baum gilt weiterhin als Stadtbaum, sodass das Grünflächenamt die Baumpflege übernimmt. Eine interne Verrechnung ist hier möglich.

In Köln wird das BRS für die Entwässerung eines öffentlichen Platzes eingesetzt. Der Stadtentwässerungsbetrieb StEB erbringt die Entwässerungsleistung und stellt die Kosten der Stadt als dem Träger dieses öffentlichen Platzes in Rechnung. Die Zuständigkeit für die Wartung war zum Zeitpunkt des Experteninterviews noch nicht vollständig geklärt.

Weitere kooperative Finanzierungsansätze wurden in anderen Forschungsprojekten untersucht (Geyler und Diemar, 2023).

Trotz der aktuellen Vielfalt der Kostenträgerschaft scheint sich die Refinanzierung der Kosten über die Niederschlagswassergebühren als Regelfall der Finanzierung herauszubilden.

Gleichwohl: Die Kosten eines BRS sind im Verhältnis zu einer konventionellen Maßnahme wie beschrieben höher. Sie generieren aber eben auch positiven externen Nutzen, deren Finanzierung über Haushaltsmittel oder auch Förderinstrumente denkbar ist. Vor diesem Hintergrund soll hier abschließend noch knapp der Bogen zur Teilfinanzierung über Fördermittel geschlagen werden.

7.3.4 Fördermittel

Eine aktuelle Fördermöglichkeit in NRW besteht im Rahmen des Förderprogramms ZunA – Zukunftsfähige und nachhaltige Abwasserbeseitigung NRW (NRW.Bank, 2025) das Anpassungen an den Klimawandel fördert, die der Versickerung und Speicherung von Niederschlagswasser dienen. Allerdings wurde das BRS noch nicht in die Liste der förderfähigen Maßnahmen aufgenommen. Im Rahmen der Interviews wurde festgestellt, dass insbesondere kleinere Kommunen häufig aufgrund des hohen (wahrgenommenen Aufwands) keine Fördermittel beantragen.

8 Einflüsse des Boden-Rohr-Systems auf die Normung

Für die nachfolgenden Darstellung der Einflüsse des BRS auf die Normung ist der Industriepartner EADIPS / FGR (Christoph Bennerscheidt) verantwortlich.

Regelwerke haben die Aufgabe eine standardisierte und verbindliche Grundlage für Planung, Bauausführung und Qualitätssicherung zu schaffen. Dies gilt im besonderen Maße für Regelwerke, in denen das Zusammenspiel zwischen unterschiedlichen Akteuren bei innerstädtischen Schwammstadt-Maßnahmen koordiniert werden muss. Regelwerke für die Planung, den Bau und den Betrieb dieser Anlagen sowie Regelwerke für Produkte müssen ineinandergreifen. Bei der Umsetzung von Schwammstadt-Projekten im Straßenraum sind Regelwerke von unterschiedlichen Regelwerksgebern, Zulassungsstellen oder Fachverbänden zu berücksichtigen. Zu nennen sind:

- DIN – Deutsches Institut für Normung e. v.
- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- DVGW – Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.
- FLL – Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V.
- DIBt – Deutsches Institut für Bautechnik e. V.
- GALK – Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz e. V.

Ein Beispiel für ein Regelwerk, das in Abstimmung DWA, DVGW, FGSV, FLL, GALK erarbeitet wurde, ist das DWA-M 162 – Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle (DWA, 2013), das das textgleich als FGSV 939 und DVGW GW 125 erschienen ist. Es hat zum Ziel, Wege zur gemeinsamen Nutzung des unterirdischen Raumes durch Bäume (Baumwurzeln) sowie unterirdischen Leitungen und Kanäle zu regeln. Regelwerke, die das Ziel haben, die Nutzung des unterirdischen Raumes für Bäume, für unterirdische Leitungen und Kanäle in Kombination mit Elementen der Niederschlagswasserbewirtschaftung zu regeln, existieren zurzeit nicht. Ein erster Schritt in diese Richtung ist die Gründung einer Arbeitsgemeinschaft zur Erarbeitung eines Merkblatts „Baumstandorte und Regenwasserbewirtschaftung“ unter Beteiligung der FLL, der DWA und der FGSV (DWA, 2024c).

Darüber hinaus würde es sich anbieten, die Integration von Bäumen und Schwammstadt-Elementen im Rahmen der Überarbeitung der DIN 1998 – Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Verkehrsflächen – Richtlinie für die Planung (DIN, 2018) zu prüfen. Das Regelwerk aus dem Jahr 2018 steht frühestens im Jahr 2028 wieder zur Überarbeitung an. Netzbetreiber und Grünflächenämter sollten bis dahin prüfen, ob eine Ergänzung dieser Elemente die Umsetzung von Schwammstadt-Maßnahmen im Straßenraum erleichtern kann. Zudem wurde während der Projektlaufzeit des Projekts ein Produktregelwerk DIN EN 17970 (DIN, 2024) mit Bezug zum DWA-M 162, in dem der Einsatz von wurzelfesten Verbindungen als aktive Schutzmaßnahme aufgeführt wird, veröffentlicht.

9 Literaturverzeichnis

Blum, U.; Dudley, L.; Leibbrand, F.; Weiske, A. (2005): Angewandte Institutionenökonomik. Gabler Verlag, Wiesbaden. ISBN 978-3-409-14273-1

Böll, S., Albrecht, R., Mahsberg, D. (2019): Stadtklimabäume - geeignete Habitate für die urbane Insektenvielfalt?, LWG aktuell, Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau - Institut für Stadtgrün und Landschaftsbau.

Burkhardt, M.; Kulli, B.; Saluz, A. G. (2022): Neue Herausforderungen bei der Straßenentwässerung. Recherche zum Stand des Wissens. Technischer Bericht. Ostschweizer Fachhochschule, Rapperswil. Online verfügbar unter: file:///C:/Users/markus.quirmbach/Downloads/2022_Burkhardt-etal_Bericht-Neue%20Herausforderungen-bei-der-Strassenentwaesserung.pdf, zuletzt geprüft am 07.06.2025

Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz (GALK) e.V. (2024): Positionspapier „Wassersensible Straßenraumgestaltung – Versickerungsanlagen sind keine Baumstandorte. Aktualisierte Auflage, Januar 2024; Online verfügbar unter: https://galk.de/startseite/downloads/?task=download.send&id=859:flyer-positionspapier-wassersensible-strassenraumgestaltung-2023&catid=3; zuletzt geprüft am 07.06.2025

Deutscher Wetterdienst (2023): HYRAS - Hydrometeorologische Rasterdaten. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/hyras/hyras.html, zuletzt aktualisiert am 26.01.2023, zuletzt geprüft am 14.03.2023.

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (2009): DIN EN 598:2009-10. Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gusseisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 598:2007+A1:2009.

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (2018): Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Verkehrsflächen - Richtlinie für die Planung, Ausgabe 2018-07

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (2022): DIN EN 15542:2022-02 - Entwurf. Rohre, Formstücke und Zubehör aus duktilem Gusseisen - Zementmörtelumhüllung von Rohren - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche und Englische Fassung prEN 15542:2021.

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (2024): DIN EN 17970:2024-08. Rohre aus duktilem Gusseisen - Steckmuffen-Verbindungen für Rohrsysteme aus duktilem Gusseisen - Widerstandsfähigkeit gegen Wurzeleinwuchs - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 17970:2024.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2013): Merkblatt DWA-M 162: Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle. Textgleich als DVGW GW 125 und FGSV-Nr. 939 erschienen.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2020): Arbeitsblatt DWA-A 102-2. Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2024a): Arbeitsblatt DWA-A 118. Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von zuletzt geprüft am 07.06.2025.Entwässerungssystemen.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2024b): Arbeitsblatt DWA-A 138-1. Anlagen zur Versickerung von Niederschlagwasser Teil 1: Planung, Bau, Betrieb.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2024c): Vorhabensbeschreibung zum Merkblatt DWA-M 163 vom 01.09.2024. Online verfügbar unter: https://de.dwa.de/de/regelwerk-news-volltext/erarbeitung-des-merkblatts-dwa-m-163-baumstandorte-und-regenwasserbewirt-schaftung.html, zuletzt geprüft am 07.06.2025

Erlei, M.; Leschke, M.; Sauerland, D. (2007): Neue Institutionenökonomik. Schäffer Poeschel Verlag, Stuttgart. ISBN 978-3-7910-2296-3

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012): RStO 12/24: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. Ausgabe 2012 / Fassung 2024 Online verfügbar unter https://www.fgsv-verlag.de/rsto-12-24, zuletzt geprüft am 07.05.2025.

Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2010): Empfehlungen für Baumpflanzungen. Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate.

Freie Hansestadt Bremen Senator für Umwelt, Bau und Verkehr (SUBV) (Hg.) (2015): Merkblatt für eine wassersensible Stadt- und Freiraumgestaltung. Empfehlungen und Hinweise für eine zukunftsfähige Regenwasserbewirtschaftung und eine Überflutungsvorsorge bei extremen Regenereignissen in Bremen.

Fritsch, M. (2014): Marktversagen und Wirtschaftspolitik, Verlag Franz Vahlen, ISBN 978 3 8006 4771 2

Gantner, K. (2002): Nachhaltigkeit urbaner Regenwasserbewirtschaftungsmethoden. Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 20. TU FG Siedlungswasserwirtschaft, Berlin. ISBN 3-936812-20-9

Geyler, S.; Diemar, A. (2023): Abschlussbericht TransMiT, Teil B. B 1.9 Finanzierungsansätze zur Bereitstellung integraler blau-grüner Maßnahmen im öffentlichen Raum. Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Universität Leipzig (IIRM). Online verfügbar unter: https://www.transmit-zukunftsstadt.de/images/2023/Kapitel_B_19.pdf,

Grimble, R.; Wellard, K. (1997): Stakeholder methodologies in natural resource management. Agricultural Systems, Vol. 55, No. 2, pp. 173-193, DOI: 10.1016/S0308-521X(97)00006-1

Grüning, H.; Schulte, A.; Siering, N. (2021): Möglichkeiten der Be- und Entwässerung durch Baumrigolen. gwf Wasser+Abwasser, Nr. 162, S. 69-77, Vulkan-Verlag.

HafenCity Universität Hamburg (HCU) (2025): BlueGreenStreets 2.0: implementieren, evaluieren, verstetigen. Toolbox 2.0, Essentials für die Umsetzung; Forschungsbericht; Fachgebiet Umweltgerechte Stadt- und Infrastrukturplanung; Online verfügbar unter: https://doi.org/10.34712/142.65, zuletzt geprüft am 30.05.2025.

Hanley, N.; Spash C. L. (1993): Cost–Benefit Analysis and the Environment. Edward Elgar Publishing. No. 205

Kändler, G., Adler, P., Hellbach, A. (2011): Wie viel Kohlenstoff speichern Stadtbäume? Eine Fallstudie am Beispiel der Stadt Karlsruhe. FVA-Einblick, No. 2, S. 7-10.

Kirsch, G. (2004): Neue Politische Ökonomie, UTB, Stuttgart, 5. Auflage, ISBN 978 3 838 582726.

Knieps, G. (2008): Wettbewerbsökonomie – Regulierungstheorie, Industrieökonomie, Wettbewerbspolitik, Springer, ISBN 978 3 540 78348 0

Kuckartz, U.; Rädiker, S. (2022): Qualitative Inhaltsanalyse. Juventa Verlag, Weinheim, Basel. 5. Auflage. ISBN 978-3-7799-6231-1

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) (2011): Dezentrale Niederschlagswasserbehandlung in Trennsystemen – Umsetzung des Trennerlasses. Abschlussbericht des Forschungsprojekts. Online verfügbar unter: https://www.lanuk.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/abwasser/forschung/pdf/20111125_Gesamtbericht.pdf, zuletzt geprüft am 07.06.2025.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) (2022): Anlagen zur naturnahen Regenwasserbewirtschaftung - Planung, Bau und Betrieb von belebten, oberirdischen Anlagen, LANUV-Arbeitsblatt 52, Recklinghausen, Online verfügbar unter: https://www.lanuk.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/40052.pdf, zuletzt geprüft am 07.06.2025.

Martin, W.; Rink, W. (2014): Erneuerung des Verbandskanals DN 800 und DN 1000 des Abwasserzweckverbandes Schwarzbachtal zwischen Bernau und der Kläranlage. Guss-Rohrsysteme Nr. 48, S. 25 – 29. Online verfügbar unter: https://media.eadips.org/wp-content/downloads/jahreshefte-dt/48-EADIPS-Jahresheft-2014.pdf, zuletzt geprüft am 07.06.2025

Matyssek, R.; Fromm, J.; Rennenberg, H.; Roloff, A. (2010): Biologie der Bäume. Von der Zelle zur globalen Ebene. Verlag Eugen Ulmer; UTB, Stuttgart. ISBN 978-3-8001-2840-2

Matzarakis, A., Streiling, S. (2004): Stadtklimatische Eigenschaften von Bäumen, Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, No. 64, S. 307-310.

Möller, G. (2016). Geotechnik- Bodenmechanik. Berlin: Ernst & Sohn.

Müller, R. A.; van Afferden, M.; Khurelbaatar, G.; Ueberham, M.; Reese, M.; Fischer, H.; Geyler, S.; Hofmann, E.; Wüstneck, T.; Ziegenbein, T.; Sahlbach, T.; Winkler, U.; Berbig, J.; Mohr, M.; Stefan, M. (2023): Wege zum abflussfreien Stadtquartier. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Nowak, D. J. (2002): The Effects of Urban Trees on Air Quality. USDA Forest Service.

NRW.Bank (2025): Zukunftsfähige und nachhaltige Abwasserbeseitigung NRW (ZunA NRW), Online verfügbar unter: https://www.nrwbank.de/de/foerderung/foerderprodukte/60185/zukunftsfaehige-und-nachhaltige-abwasserbeseitigung-nrw-zuna-nrw.html, zuletzt geprüft am 07.06.2025.

Oelmann, M. (2019): Zur Neuausrichtung der Preis- und Qualitätsregulierung in der deutschen Wasserwirtschaft, Springer Gabler, unveränderter Nachdruck Originalschrift 2005, ISBN 978 3 658 24677 8.

Oelmann, M.; Roters, B. (2021a): Zur Entwicklung von Niederschlagswasser-Gebühren-modellen – Teil 1: Übersicht und Bewertungskriterien", KA – Korrespondenz Abwasser Abfall, 11/2021, S. 931ff.

Oelmann, M.; Roters, B. (2021b): Zur Entwicklung von Niederschlagswasser-Gebührenmodellen – Teil 2: Beispielhafte Anwendung der Bewertungskriterien auf den Rabattierungstatbestand Gründach“, KA – Korrespondenz Abwasser Abfall, 12/2021, S. 1020 ff.

openko.de (2023): KOSTRA-DWD-2020. öffentlich zugängliche Tabelle basierend auf den Daten des KOSTRA-DWD-2020 Atlas. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter https://www.openko.de/, zuletzt geprüft am 07.05.2025

Opper, S. (2001): Der Stand der Neuen Institutionsökonomik. Wirtschaftsdienst – Zeitschrift für Wirtschaftspolitik. Deutsche Zentralbibliothek für Wirtschaftswissenschaften - Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft (ZBW), ISSN 0043-6275. - Bd. 81.2001, 10, S. 601-608

Rammelsberg, J. (2016): Die Geschichte der Trinkwasser-Systeme im Laufe der Jahrhunderte. Guss-Rohrsysteme Nr. 50, S. 17 – 23. Online verfügbar unter: https://media.eadips.org/wp-content/downloads/jahreshefte-dt/50-EADIPS-Jahresheft-2016.pdf, zuletzt geprüft am 07.06.2025

Rockwool (2024): Wie wird Steinwolle hergestellt? Online verfügbar unter: https://www.rockwool.com/de/rat-und-tat/vertiefendes-wissen/umweltschutz-und-wohngesundheit/herstellung-steinwolle/, zuletzt geprüft am 21.04.2024

Rogall, H. (2006): Volkswirtschaftslehre für Sozialwissenschaftler. VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden. ISBN 978-3-531-14538-9

Schmidt, H.-H., Buchmaier, R.F., Vogt-Breye, C. (2014). Grundlagen der Geotechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Sevriens, D. (2023): Aufnahmen der Probefelder. Roermond: Rockwool.

Sieker, H.; Steyer, R.; Büter, B.; Lessmann, D.; von Tils, R.; Becker, C.; Hübner, S. (2019): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. Abschlussbericht. Texte Nr. 111/20219. Umweltbundesamt (UBA).

Skiera, B.; Moll, G. (1992): The Sad State of City Trees. Am. Forests, pp. 61-64

Stadtentwässerungsbetriebe Köln; Stadt Köln (2018): Leitfaden für eine wassersensible Stadt- und Freiraumgestaltung in Köln. Empfehlungen und Hinweise für eine zukunftsfähige Regenwasserbewirtschaftung und für die Überflutungsvorsorge bei extremen Niederschlagsereignissen. 2. Auflage. Hg. v. Stadtentwässerungsbetrieben Köln, AöR. Online verfügbar unter https://steb-koeln.de/Redaktionell/ABLAGE/Downloads/Brosch%C3%BCren-Ver%C3%B6ffentlichungen/Geb%C3%A4udeschutz/FirstSpirit_1489560439762LeitfadenPlanung_ES_140217_web.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2024.

Soares, A. L.; Rego, F. C.; McPherson, E. G.; Simpson, J. R.; Peper, P. J.; Xiao, Q. (2011): Benefits and costs of street trees in Lisbon, Portugal. Urban Forestry & Urban Greening. Vol. 10, No. 2, pp. 69-78. DOI: 10.1016/j.ufug.2010.12.001

Strauß, H. P. (2018): Ingenieurgeologie. Berlin: Springer.

Sutter, V.; Amstein + Walthert AG (2019): Planungshilfe Grün- und Freiflächen. Handlungsspielraum und Hilfsmittel für die Planung, Umsetzung und Bewirtschaftung.

Tan, Z., Ka-Lun Lau, K. , Ng, E. (2015): Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment, Energy and Buildings, No. 114, S. 265-274.

Umweltbundesamt (UBA) (2024): UBA Texte 133/2024: Entwicklung eines Laborprüfverfahrens zum Rückhalt von partikulären Stoffen in dezentralen Niederschlagsbehandlungsanlagen bei Einleitung in Oberflächengewässer Übersicht zu Behandlungstechniken in Deutschland, Anlage E. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-eines-laborpruefverfahrens-rueckhalt, zuletzt geprüft am 30.05.2025.

visaplan GmbH. (2012). Stand und Einsatzbereiche der Injektionsverfahren bei der Kanal-sanierung. Online verfügbar unter: https://www.unitracc.de/aktuelles/artikel/stand-und-einsatzbereiche-der-injektionsverfahren-bei-der-kanalsanierung, zuletzt geprüft am 13.03.2025

Von Wangenheim, D., Banda, J., Schmitz, A., Boland, J., Bishopp, A., Maizel, A., Stelzer, E. H. K., Bennett, M. (2020): Early developmental plasticity of lateral roots in response to asymmetric water availability. Nat. Plants 6, 73–77. Online verfügbar unter: https://doi.org/10.1038/s41477-019-0580-z, zuletzt geprüft am 07.06.2025

Welling, M.; Denhardt, A.; Salecki, S.; Wagner, J. (2020): Kosten und Nutzen von grünen Klimaanpassungsmaßnahmen in Bremen: Fokus Straßenbäume. FactSheet. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Online verfügbar unter: https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/2021/BREsilient_FactSheet_Strassenbaeume.pdf, zuletzt geprüft am 07.06.2025

ZTV SoB-StB. (2020). Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau. Bonn: FGSV.

Handlungsempfehlung für die Umsetzung des Boden-Rohr-Systems

Die Handlungsempfehlung wurde im Rahmen des BMBF-Verbundforschungsprojekts

BoRSiS – Boden-Rohr-System als innovatives Element der klimaangepassten Stadtentwässerung (Förderkennzeichen 13FH002KA0) im Zeitraum 01.10.2021 – 31.12.2024 von folgenden Projektbeteiligten erarbeitet

Prof. Dr. Markus Quirmbach (Verbundkoordinator), Henrike Walther, Saphira Schnaut (Hochschule Ruhr West, Lehrgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Hydrologie und Wasserbau)

Prof. Dr. René Schäfer, Recep Molla Hasan (Hochschule Ruhr West, Lehrgebiet Geotechnik)

Prof. Dr. Mark Oelmann (Hochschule Ruhr West, Lehrgebiet Infrastruktur und Netze)

Prof. Dr. Christoph Mudersbach, Felix Simon (Hochschule Bochum, Lehrgebiet Wasserbau und Hydromechanik)

Christoph Benerscheidt (European Association for Ductile Iron Pipe Systems EADIPS® / Fachgemeinschaft Guss-Rohrsysteme (FGR®) e. V.

Dirk Jan Boudeling, Dave Sevriens (Rockflow – Rockwool Rainwater Systems)

Dr. Markus Streckenbach (Sachverständigenbüro für urbane Vegetation)

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

FORSCHUNG AN FACHHOCHSCHULEN

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis III
Tabellenverzeichnis V
Haftungsausschluss für externe Links VI
Glossar VI
1 Einführung 1
2 Funktionsweise des Boden-Rohr-Systems 2
3 Standortauswahl und Bestandsaufnahme 8
3.1 Potenzielle Standorte und deren Nutzung 8
3.2 Bestandsaufnahme des ausgewählten Standorts 8
4 Planung und Dimensionierung 10
4.1 Belastungsklasse der Straße/ In-situ Feldversuche 11
4.2 Dimensionierungen 14
4.2.1 Niederschlagswasserspeicher des BRS 14
4.2.2 Dimensionierung des Wurzelraums des BRS 16
4.3 Auswahl der Baumarten 18
4.4 Ausführung des Boden-Rohr-Systems: Baumaßnahme im Detail 18
4.4.1 Rohrsysteme 20
4.4.2 Niederschlagswasser-Speicherelemente allgemein 21
4.4.3 Steinwolle (Rockflow) als innovatives dezentrales Entwässerungssystem 21
4.4.4 Einbauanleitung für BRS-Elemente im Leitungsgraben 23
4.4.5 Niederschlagswasser sammeln und vorbehandeln 24
5 Kosten und Nutzen des Systems 26
5.1 Akteure und Rahmenbedingungen 26
5.2 Kosten und Nutzen 27
5.3 Finanzierung und Fördermittel 28
6 Genehmigungen 29
7 Unterhaltung und Wartung 30
8 Bewusstseinsbildung und Partnerschaften 31
9 Pilotprojekte 32
9.1 Pilotprojekt Köln 32
9.2 Pilotprojekt Leichlingen 33

10 Literaturverzeichnis 35

Anhang 39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Draufsicht auf das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (oberflächennahe Zufuhr des Niederschlagswassers) 3

Abbildung 2: Querschnitt B-B durch das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (oberflächennahe Zufuhr des Niederschlagswassers) 3

Abbildung 3: Draufsicht auf das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (tiefliegende Zufuhr des Niederschlagswassers).....4

Abbildung 4: Querschnitt B-B durch das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (tiefliegende Zufuhr des Niederschlagswassers).....4

Abbildung 5: Aufbau des Boden-Rohr-Systems im Leitungsgraben 7

Abbildung 6: Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht (FGSV, 2012).....11

Abbildung 7: Beispielhafter Aufbau einer befestigten Straße (FGSV, 2012) 12

Abbildung 8 Diagramm zur Bestimmung des Verformungsmoduls E_{V2} für verschiedene Gesteinsschichtdicken 14

Abbildung 9 Bei der Dimensionierung des BRS nicht berücksichtigte Bereiche (rot markiert).....15

Abbildung 10: Zusammenhang zwischen Baumgröße und durchwurzelbarem Bodenvolumen auf Grundlage der Formel von Bakker/ Kopinga.....17

Abbildung 11 Aufbau und Elemente eines Leitungsgrabens Bettungstyp 1 nach EN 1610 19

Abbildung 12 Rockflow Steinwollelemente in verschiedenen Bauhöhen 22

Abbildung 13 Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus mit Rockflow Steinwolle, mit Wasserzufuhr und Entlüftung mittels gefräster Rohrkanäle in der Steinwolle 22

Abbildung 14 Einbau der BRS-Elemente im Leitungsgraben 23

Abbildung 15 Fest- bzw. Schadstoffeintrag über den Eintragspfad Niederschlagswasser 25

Abbildung 16: a) Übersichtsplan des Marktplatzes an der Kemperwiese; b) Teilprojekt BoRSiS im Projekt An der Kemperwiese, Übersichtsplan (Stand: Entwurfsplanung 2024, StEB Köln, 2024).....32

Abbildung 17: Teilprojekt BoRSiS im Projekt An der Kemperwiese, Querschnitt (Stand: Entwurfsplanung 2024, StEB Köln, 2024).....33

Abbildung 18: Draufsicht auf die Örtlichkeiten in Leichlingen, Datenbasis: Google Maps (Google, o.J.), eigene Überarbeitung.....34

Abbildung 19: Längsschnitt der Systemskizze am Standort Friedensstraße in Leichlingen 34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Porenanteil n der Bodengemische 0/2; 2/4; 16/32 6

Tabelle 2: Mögliche Belastungsklassen für die typischen Entwurfssituation nach Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV, 2012) 11

Tabelle 3: Versuchsergebnisse für die Steinwollvariante WM 2005 13

Tabelle 4: Nennweiten und Außendurchmesser sowie Volumen pro Meter Rohrleitung für duktile Gussrohre nach EN 598 mit Zementmörtel-Umhüllungen nach EN 15542 16

Tabelle 5: Anforderungen für die Auswahl der Speicher-/ Versickerungskörper 21

Haftungsausschluss für externe Links

Bitte beachten Sie, dass Verweise auf externe Links in dieser Handlungsempfehlung nicht aktualisiert werden. Für die Inhalte der verlinkten Seiten sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich. Die Autor:innen übernehmen keine Haftung für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität der dort bereitgestellten Informationen.

Glossar

Im Folgenden werden zentrale Begriffe definiert, die ein einheitliches Verständnis unterstützen sollen. Diese Definitionen orientieren sich an den Vorgaben der FGSV_939 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) et al., 2013) und den FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), 2010).

- **Anstehender Boden / Untergrund**: Der natürliche Boden, der vor Beginn von Bau- oder Pflanzmaßnahmen vorhanden war.
- **Baumscheibe**: Die begrenzte Fläche um den Baumstamm, die aus der Vegetationstragschicht besteht. Diese Fläche kann offen, befestigt oder begrünt sein, muss aber dauerhaft luft- und wasserdurchlässig bleiben.
- **Deckschicht**: Die oberste Schicht von Verkehrsflächen, z. B. Pflasterdecken, Plattenbeläge oder Asphalt, die als Abschluss des Straßenaufbaus dient.
- **Erweiterter Wurzelraum**: Ein durch Baumaßnahmen vergrößerter Bodenbereich, der dem Baum zusätzlichen Wurzelraum bietet.
- **Leitungsgraben**: Ein Graben, der für den Einbau von unterirdischen Leitungen dient.
- **Leitungszone**: Der Bereich um unterirdische Leitungen, der aus Bettung, Seitenverfüllung und Abdeckung besteht.
- **Oberbau**: Der Teil einer Verkehrsfläche, der unmittelbar auf dem Planum des Baugrundes liegt und aus Tragschichten und Deckschichten besteht.
- **Pflanzgrube**: Ein großvolumiger Raum, in dem der anstehende Boden durch geeignete Substrate oder Böden ersetzt werden kann, um in den ersten Standjahren optimale Wachstumsbedingungen für Bäume zu schaffen.
- **Planum**: Eine technisch bearbeitete Oberfläche des Baugrunds oder anderer Schichten, die definierte Anforderungen wie Gefälle, Höhenlage und Ebenheit erfüllt.
- **Sanierungsmaßnahme**: Eine Maßnahme, die der wesentlichen Verbesserung oder Umgestaltung eines Gebiets dient, um städtebauliche Missstände zu beheben (§ 136 Abs. 2 Satz 1 BauGB).

- **Substrat**: Ein speziell hergestelltes Bodenersatzmaterial, das aus verschiedenen Stoffen oder aufbereiteten Böden gemäß festgelegten Anforderungen besteht.
- **Tragschicht**: Der untere Teil des Oberbaus, der zwischen der Deckschicht und dem Baugrund liegt und zur Lastverteilung dient.
- **Unterbau**: Eine Aufschüttung auf dem Untergrund, die als tragende Schicht für Verkehrsflächen dient.
- **Unterirdische Leitungen**: Sammelbegriff für unterirdische Kanäle und Leitungen, die der Ver- und Entsorgung von Gas, Wasser, Fernwärme, Abwasser, Strom und Telekommunikation dienen.
- **Vegetationstragschicht**: Eine Bodenschicht, die aufgrund ihrer Zusammensetzung und Eigenschaften für den Bewuchs mit Pflanzen geeignet ist.
- **Wurzelraum**: Der Bodenbereich, der von einem Baum zukünftig durchwurzelt werden kann. Bei gut belüfteten Böden, kann dieser mehrere Meter in die Tiefe reichen.
- **Wurzelfest**: Eigenschaft von Materialien und Bauteilen, die verhindern, dass Wurzeln in sie eindringen.
- **Wurzelgraben**: Ein Graben, der dazu dient, Wurzeln gezielt zu anderen durchwurzelbaren Bereichen außerhalb der Pflanzgrube zu leiten.

Im Rahmen des Schlussberichtes sowie der Handlungsempfehlung wird der untere Bereich, in dem das Leitungsrohr liegt und der mit grobkörnigem Material verfüllt ist, gemäß DIN EN 1610 (2015) als **Leitungszone** bezeichnet. Diese Leitungszone soll den angeschlossenen Bäumen als **erweiterter Wurzelraum** dienen. Das gesamte System, bestehend aus Steinwollelement, Sandschicht und darunter liegender Leitungszone entspricht einem **Leitungsgraben**. Das Gesamtkonstrukt (inkl. der Übergangsbereiche zu den Baumstandorten) wird nachfolgend als **Boden-Rohr-System (BRS)** bezeichnet.

1 Einführung

Die Auswirkungen des Klimawandels können nicht länger ignoriert werden. Eine angemessene Anpassung an die erwarteten Veränderungen ist in nahezu allen Lebensbereichen erforderlich (Zhang et al., 2023). Angesichts der Tatsache, dass Städte einen zunehmend großen Anteil der Weltbevölkerung beherbergen und Zentren der Wirtschaft bilden, wird die Anpassung in städtischen Gebieten besondere Bedeutung erlangen (European Environment Agency (EEA), 2012). Die Konzepte der Schwammstadt, der wasserbewussten Stadtentwicklung und der Blau-Grünen Infrastruktur verfolgen ein gemeinsames Ziel: Städte widerstandsfähiger gegenüber den Folgen des Klimawandels zu machen, indem der natürliche Wasserkreislauf in urbanen Gebieten gefördert und integriert wird. Diese Ansätze adressieren eine Reduzierung der negativen Auswirkungen der Urbanisierung, insbesondere die durch Versiegelung bedingte Zunahme des Oberflächenabflusses und der urbanen Hitzeinsel. Durch die Bereitstellung von Flächen, die Wasser aufnehmen, speichern und langsam wieder freisetzen sowie die Integration von Vegetation und Grünflächen in die Stadtplanung, können Überschwemmungsrisiken verringert, urbane Hitzeinseln gemildert und das Mikroklima verbessert werden. Gleichzeitig tragen diese Flächen zur Stabilisierung des Wasserhaushalts bei, indem Regenwasser vor Ort zurückgehalten und wiederverwendet wird. Diese Ansätze fördern eine nachhaltige und umweltbewusste Stadtentwicklung, die sowohl die Lebensqualität der Stadtbewohner steigert, als auch die ökologischen Funktionen urbaner Räume erhält (Becker et al., 2015; Oke, 1973; Transforming Cities, 2020; Virgil, 2022).

Das vom BMBF geförderte Verbundprojekt „Boden-Rohr-System als innovatives Element der klimaangepassten Stadtentwässerung“ (BoRSiS) stellt eine innovative Lösung für die Anpassung von Städten an den Klimawandel im Sinne der Blau-Grünen Infrastrukturen dar. Dieses System vereint mehrere Anpassungsstrategien, indem es Baumstandorte mit existierenden Leitungsgräben und Regenwasser-Speicherelementen verbindet. Das Boden-Rohr-System schafft einen Speicherraum für Niederschlagswasser bei (Stark-)Regen, der gleichzeitig als erweiterter Wurzelraum für Bäume dient. Dadurch wird eine nachhaltige Lösung zur Verbesserung der Baumvitalität ermöglicht, ohne zusätzlichen Platzbedarf an der Oberfläche zu schaffen. Das gespeicherte Wasser wird zeitverzögert zur Verdunstung über die Bäume bereitgestellt, was sowohl die Wasserspeicherung als auch die Versorgung der Vegetation unterstützt und gleichzeitig die Kanalisation bei Starkregenfällen entlastet.

2 Funktionsweise des Boden-Rohr-Systems

Die nachfolgende Variante des Boden-Rohr-Systems (BRS) stellt eine Vorzugsvariante dar, die individuell je nach den örtlichen Randbedingungen modifiziert werden kann. Da das Projektende von BoRSiS und die Veröffentlichung des neuen DWA-A 138-1 (DWA, 2024b) zur Niederschlagswasserversickerung fast zeitgleich Ende 2024 stattgefunden haben, bestand bei der Erstellung des Abschlussberichtes sowie der hier vorliegenden Handlungsempfehlung eine Unsicherheit, wie in Zukunft mit der Reinigung bzw. Vorbehandlung von Dachwasser (Flächengruppe D) in der praktischen Umsetzung umgegangen wird. Abbildung 1 (Draufsicht) und Abbildung 2 (Querschnitt im Schnitt B-B) zeigen daher zunächst exemplarisch, anhand der idealen Vorstellung des Konsortiums, wie die Umsetzung des BRS aussehen kann, wenn das Niederschlagswasser der angeschlossenen Dächer oberflächennah dem Baumstandort zugeführt wird. In dieser Variante wird eine Reinigungsleistung des eingesetzten Substrates am Baumstandort angenommen. Abbildung 3 (Draufsicht) und Abbildung 4 (Querschnitt im Schnitt B-B) zeigen exemplarisch, wie die Umsetzung des BRS aussehen kann, wenn eine tiefliegende Zuführung des Niederschlagswassers erfolgt. Bei dieser Variante sind im Einzelfall die Behandlungsanforderungen des Niederschlagswassers mit der zuständigen Behörde abzustimmen. Alle vier Abbildungen sind zudem in einer größeren Ansicht im Anhang zu finden.

Aus dem Systemquerschnitt wird deutlich, dass zwischen dem Baumstandort und dem BRS unterschieden wird. Dabei ist zu beachten, dass sich Baumstandorte unterschiedlicher Bauweisen sowie Bestandsbäume an das BRS anschließen lassen.

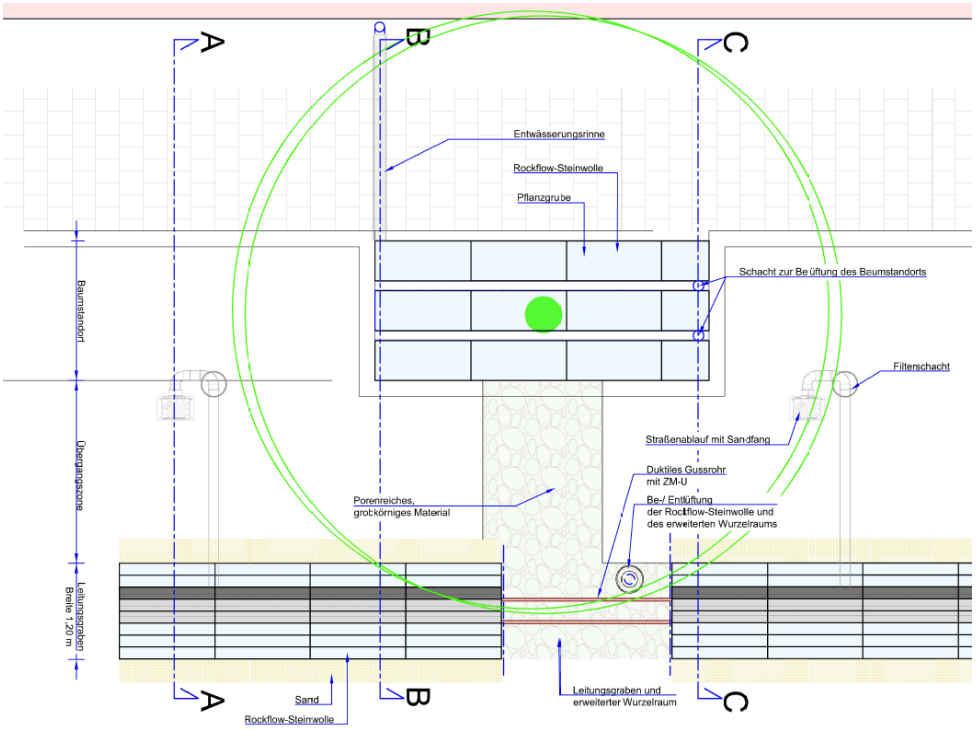


Abbildung 1: Draufsicht auf das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (oberflächennahe Zufuhr des Niederschlagswassers)

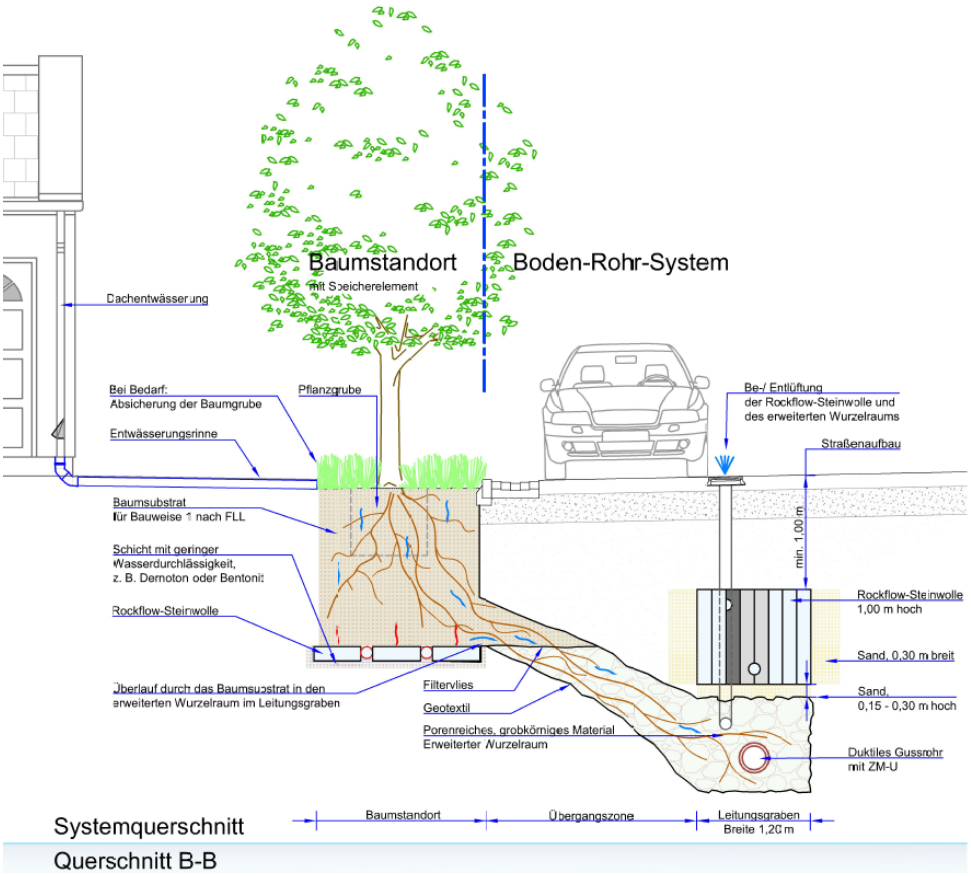


Abbildung 2: Querschnitt B-B durch das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (oberflächennahe Zufuhr des Niederschlagswassers)

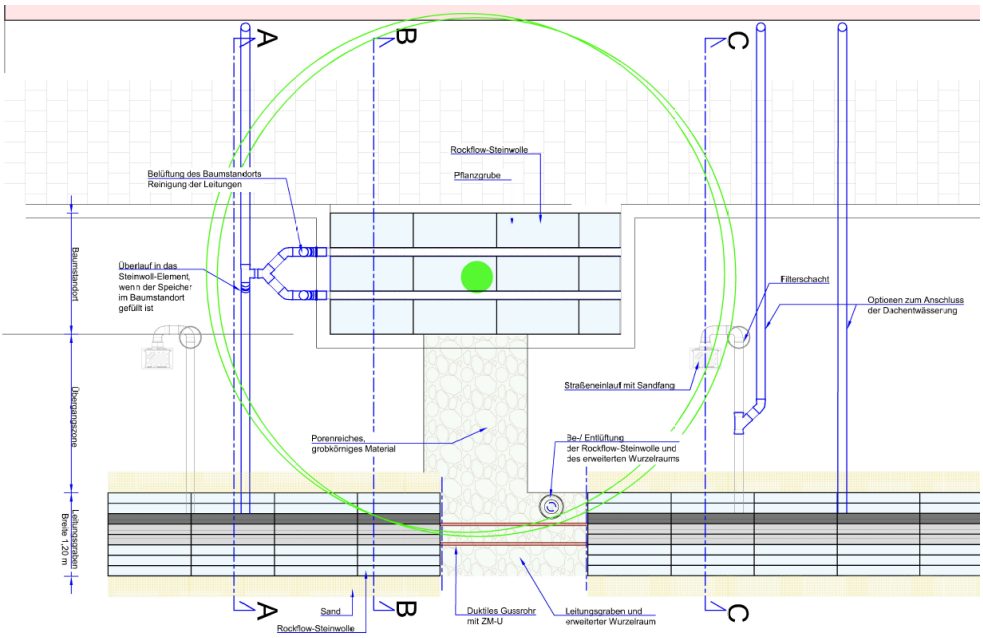


Abbildung 3: Draufsicht auf das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (tiefliegende Zufuhr des Niederschlagswassers)

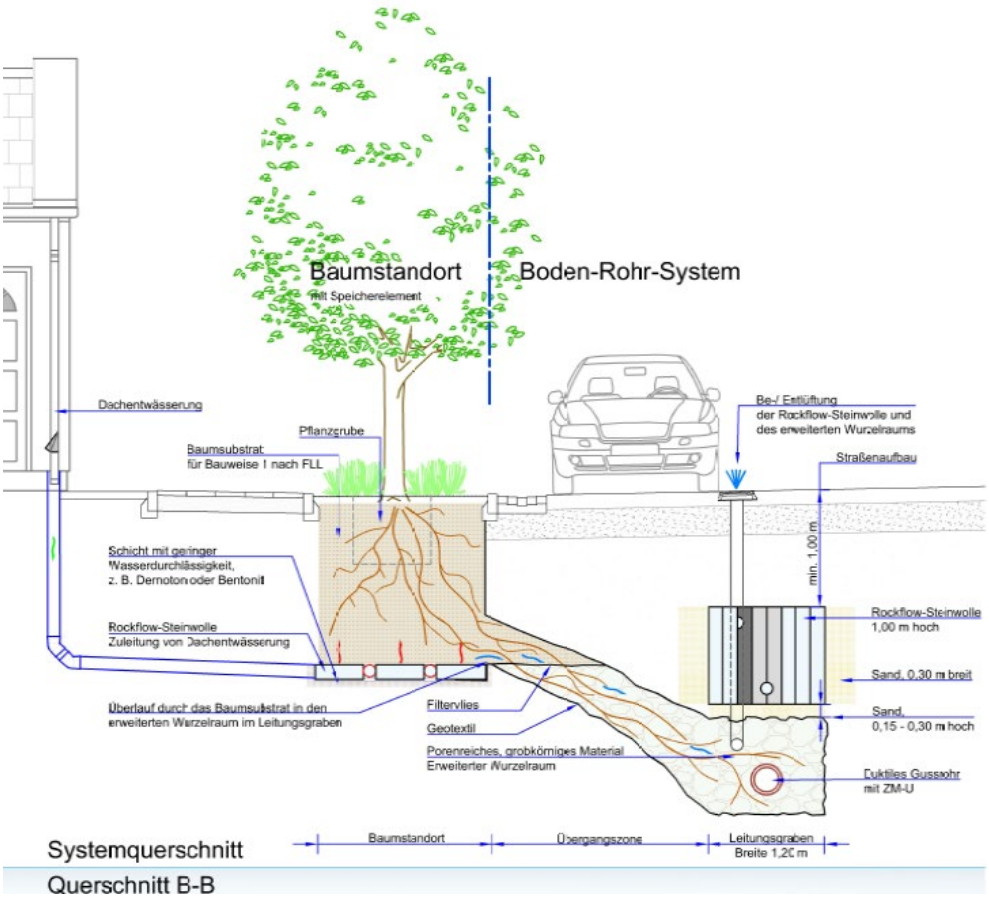


Abbildung 4: Querschnitt B-B durch das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (tiefliegende Zufuhr des Niederschlagswassers)

In der Vorzugsvariante wird die Kombination aus einem neu angepflanzten Baum mit optimierter Pflanzgrube, dem BRS und der Übergangszone zwischen Pflanzgrube und BRS betrachtet. Die Pflanzgrube in der betrachteten Variante ist nach den Vorgaben der FLL (FLL, 2010) auszuführen und wird zusätzlich auf der Sohle mit einem Steinwollelement ausgestattet (Abbildung 2, Abbildung 4). Das darin speicherbare Niederschlagswasser soll dem Jungbaum, in den ersten Jahren nach der Pflanzung, zusätzlich kapillar aufsteigendes Wasser, z. B. in Trockenzeiten zur Verfügung stellen. In die optimierte Pflanzgrube wird Niederschlagswasser zur Bewässerung des Baumes eingeleitet; vorzugsweise Niederschlagswasser von Dachflächen. Eine Vernässung der Pflanzgrube wird durch die Wahl eines porenreichen und gut belüftbaren Substrats im Übergangsbereich zwischen Pflanzgrube und BRS vermieden. Diese Zone hat somit eine Doppelfunktion. Sie fungiert zum einen als Wurzelgraben und zum anderen als Überlauf für Bodenwasser in der Pflanzgrube bei stärkeren Niederschlagsereignissen. Die Fließrichtung des Wassers wird im Systemquerschnitt durch die geschlängelten blauen Pfeile verdeutlicht. In dieser Übergangszone werden sowohl das Baumsubstrat aus dem Baumstandort als auch das grobkörnige Material der Leitungszone verbaut. Damit sich die Materialien nicht mit dem anstehenden Boden vermischen, wird ein durchwurzelbares Filtervlies vorgesehen. Über das duktile Gussrohr mit Zementmörtel-Umhüllung wird, je nach System, Misch-, Schmutz- oder Regenwasser abgeleitet. Als Bettungsmaterial des duktilen Gussrohres, das als Baumstandort verbindender Wurzelgraben ausgeführt ist, wird grobkörniges Material verwendet. Dieses kann durch die Grobporen gut belüftet werden und durch die Kombination aus Luft und Wasser das Wurzelwachstum in der Tiefe fördern. Weitere Elemente des BRS sind deshalb Bauteile zur Be- und Entlüftung des Wurzelraums. Diese Bauteile werden möglichst weit von den Baumstandorten angeordnet. Die Kombination aus grobporenreichem Substrat und dauerhafter Belüftung sind für die langfristige Vitalität der Wurzeln im BRS von entscheidender Bedeutung.

Der oberhalb des Wurzelraums angeordnete Regenwasserspeicher aus Steinwolle in Kombination mit einer Zwischenschicht aus Sand hat mehrere Funktionen. Dieses, ebenfalls linienförmig angeordnete Element, dient als Speicherelement insbesondere bei Starkregen. Dies trägt zur Entlastung der Kanalisation bei. Die Steinwolle hat ein Porenvolumen von 95 % für die Aufnahme großer Wassermengen und kann das gespeicherte Wasser schnell wieder abgeben. Im Rahmen des BoRSiS-Verbundprojekts wurden maßstabsgetreue Versuche durchgeführt, welche eine detaillierte Untersuchung der Befüll- und Entleerungsprozesse ermöglichten. Innerhalb eines Zeitraums von sechs bis zwölf Stunden nach einem Regenereignis können etwa 60 % bis 70 % der Niederschlagsmenge vom Steinwollelement in den darunter liegenden Wurzelraum (Leitungszone) abgegeben werden. Nach 24 Stunden werden in der Regel bereits 75 % bis 80 % abgegeben. Die restlichen 20 % bis 25 % verbleiben bis zu zwei Wochen in der Sandschicht unterhalb des Steinwollelements und befeuchten den umliegenden Boden. Somit kann eine verbesserte Wasserversorgung des Baumes über diesen Zeitraum auch bei anschließenden Trockenzeiten erzielt werden.

Als alternative Regenwasser-Speichermedien wurden sieben mineralische Gemische mit unterschiedlichen Körnungen betrachtet. Vier Körnungen (0/11; 0/16; 0/22; 0/32) wurden unter

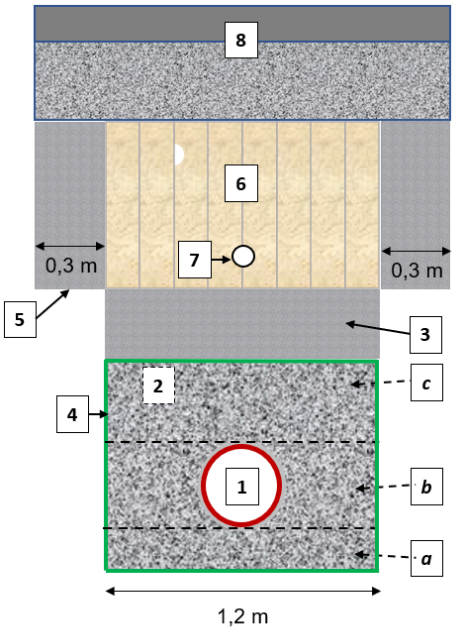
der Voraussetzung untersucht, dass das Material einheitlich im gesamten Leitungsgraben eingesetzt werden kann. Dabei wurden die Körnungen unter Einbeziehung von straßenbaulichen (FGSV) und vegetationstechnischen (FLL-Richtlinien) Anforderungen ausgewählt: Die Tragfähigkeit, das Speichervolumen n und die Wasserdurchlässigkeit k_f waren die Bewertungskriterien. Aufgrund des zonierten Aufbaus (Abbildung 5) wurden die Restriktionen erfüllt, weshalb das Bodengemisch ausschließlich unter der Bewertung eines hohen Porenanteils untersucht werden konnte. Die Ergebnisse der Versuche werden in der folgenden Tabelle 1 zusammengefasst. Aufgrund des hohen Luftporenanteils und des entsprechend großen Speicherraums für Regenwasser sind grobkörnige Gemische (≥ 16/32) bevorzugt zu verwenden.

Der in Abbildung 5 dargestellte Aufbau orientiert sich am Bettungstyp 1 nach DIN EN 1610 (2015). Dieser Aufbau darf für jede Leitungszone angewendet werden, die eine Unterstützung der Rohre über deren gesamte Länge zulässt und die unter Beachtung der geforderten Schichtdicken a, und b hergestellt wird. Dies gilt für jede Größe und Form von Rohren, z. B. kreisförmig, nicht kreisförmig und mit Fuß. Die duktilen Gussrohre nach EN 598 können bei diesem Aufbau in dem Material, Korngruppe 16/32 (Tabelle 1) oder in Material 32/64 gebettet werden. Abbildung 5 zeigt detailliert, wie das BRS im Bereich des Leitungsgraben aufgebaut werden kann.

Tabelle 1: Porenanteil n der Bodengemische 0/2; 2/4; 16/32

Korngruppen / Kriterien	0/2	2/4	16/32
Porenanteil n	35,74%	35,58%	36%
Luftgesättigter Porenanteil n_a	14%	31%	34%

1. ***Duktiles Gussrohr nach EN 598 mit Zementmörtel-Umhüllung nach EN 15542***
2. ***(a) Rohrbettung***
   (b) Seitenverfüllung
   (c) Überdeckung, jeweils nach EN 1610 aus zugelassenem porenreichen, grobkörnigen Material (z. B. 32/64 mm)
3. ***Ausgleichschicht, Schichtdicke 0,15 bis 0,3 m mit Sand***
4. ***Geotextil umschließt den Wurzelraum und dient als Übergang zu den Rockflow-Elementen***
5. ***Seitenverfüllung aus Sand, 0,3 m***
6. ***Rockflow-Elemente***
7. ***Sickerrohr***
8. ***Straßenaufbau***



Skizze nicht maßstäblich!

Abbildung 5: Aufbau des Boden-Rohr-Systems im Leitungsgraben

Beim Verbau des Systems muss sichergestellt werden, dass das Gussrohr 1 (Abwasserkanal) korrekt in das grobkörnige Material 2 eingebettet wird. Zunächst muss eine Rohrbettung 2a unterhalb des Rohres angelegt werden, gefolgt von der seitlichen Auffüllung 2b, um die Position des Rohres zu stabilisieren. Abschließend wird das Rohr, durch die Überdeckung 2c, vollständig von dem grobkörnigen Material umschlossen. Dieses Material fungiert auch als Durchlüftungsschicht des Leitungsgrabens. Darüber wird die zuvor beschriebene Sandschicht 3 aufgebracht, deren Stärke zwischen 15 und 30 cm variieren kann. Diese Sandschicht dient als Speicherraum für die zeitverzögerte Abgabe des Niederschlagswassers an den darunter liegenden Leitungsgraben und sorgt zudem für eine gleichmäßige Bettung der darüber liegenden Steinwollelemente 6. Die Leitungszone wird vollständig mit einem geeigneten Geotextil 4 umhüllt. Das Geotextil sollte so ausgewählt werden, dass es hinsichtlich seiner Filter- und Rückhalteeigenschaften optimal auf die Korngrößenzusammensetzung des anstehenden, gewachsenen Bodens sowie der Zonen 2 und 3 abgestimmt ist. Diese Maßnahme ist erforderlich, da das grobkörnige Material in der Leitungszone weder gegenüber dem anstehenden, gewachsenen Boden noch gegenüber der oberhalb angeordneten Ausgleichsschicht aus Sand eine ausreichende Filterstabilität besitzt. Eine alternative Sicherstellung der Filterstabilität durch die Auswahl von kornabgestuften Materialien ist in diesem Fall aufgrund der Vielfalt der eingesetzten Materialien nicht praktikabel. Die Steinwollelemente 6 müssen so verlegt werden, dass auf beiden Seiten mindestens 30 cm Platz für die anschließende Seitenverfüllung mit Sand 5 bleibt. Diese Bereiche werden nach dem Einbau der Elemente verdichtet. In den Steinwollelementen ist ein Kanal für die Wasserbeschickung vorgefertigt, in welchen zusätzlich ein Sickerrohr 7 eingebaut werden kann, um eine gleichmäßige Wasserverteilung sicherzustellen (Empfehlung). Ein weiterer

kleinerer Kanal im oberen Bereich des Steinwollelements ist zur Entlüftung der Elemente vorgesehen. Abschließend erfolgt ein Straßenaufbau 8 über den eingebauten Elementen.

3 Standortauswahl und Bestandsaufnahme

Das BRS stellt eine von vielen Möglichkeiten zur Umsetzung Blau-Grüner Infrastrukturen dar. Es ist jeweils individuell zu prüfen, welche Maßnahme bzw. welche Kombination von Maßnahmen zum größtmöglichen Erfolg führt. Im Folgenden werden Rahmenbedingungen beschrieben, unter denen die Umsetzung des BRS besonders zu empfehlen ist.

3.1 Potenzielle Standorte und deren Nutzung

Da das BRS eine Abkehr von herkömmlichen Bauweisen von Leitungsgräben darstellt, ist eine Umsetzung des BRS nur bei Neubauten oder Sanierungsmaßnahmen im Bestand mit Austausch des Kanalrohrs möglich. Das System erfordert zwingend eine grobkörnige, porenreiche Leitungszone, duktile und wurzelfeste Gussrohre, die in dieser Leitungszone gebettet werden können, und einen darüber liegenden Speicherraum, der vorzugsweise aus Steinwolle besteht.

Das BRS eignet sich insbesondere in Straßen bzw. Gebieten, in denen eine Entlastung des bestehenden Kanalnetzes, eine Reduzierung der Überflutungsgefahr bei Starkregen oder eine Entflechtung von Schmutz- und Regenwasser erzielt werden soll, da das Regenwasser der angrenzenden befestigten Flächen zukünftig nicht mehr ins Kanalsystem eingeleitet, sondern in den Porenräumen des BRS gespeichert wird.

Da das BRS im Forschungsvorhaben für die Belastungsklasse 3,2 untersucht wurde, wird ein Einsatz des BRS insbesondere für Wohnwege, Wohnstraßen, Quartierstraßen, Hauptgeschäftsstraßen und ähnliche Verkehrswege empfohlen. Eine Umsetzung in anderen Straßen wird nicht ausgeschlossen, soweit die sich daraus ergebenden höheren Anforderungen an den Straßenbau und den Lastabtrag berücksichtigt werden.

Das Ziel, die Standortbedingungen für Bäume zu verbessern, kann sowohl bei Neupflanzungen als auch bei Bestandsbäumen erreicht werden, solange der Verbindungsbereich zwischen Baumstandort / Pflanzgrube und Leitungszone hergestellt werden kann.

3.2 Bestandsaufnahme des ausgewählten Standorts

Bevor die Planung und der Bau des BRS begonnen werden kann, ist eine detaillierte Bestandsaufnahme des jeweiligen Standorts unerlässlich. Dabei sind verschiedene örtliche und technische Voraussetzungen zu bewerten. Im Rahmen dieser Bestandsaufnahme sind mindestens folgende Aspekte zu untersuchen:

- **Abstand zu Gebäuden:** Nach den geltenden Regelwerken, insbesondere der DWA-A 138-1 (2024b) müssen bestimmte Abstände zu Gebäuden eingehalten werden. Weitere länderspezifische Anforderungen können hinzukommen. Dies ist erforderlich,

um die Standfestigkeit der Bauwerke zu gewährleisten und mögliche Schäden (insbesondere Vernässung) durch den Bau oder die Versickerung zu vermeiden.

- **Anzuschließende Flächen:** Für die Dimensionierung des BRS sind die anzuschließenden abflusswirksamen Flächen zu bestimmen und hinsichtlich ihrer Behandlungswürdigkeit zu bewerten.
- **Art des Bauprojekts:** Das BRS kann nur in Gebieten umgesetzt werden, in denen entweder eine Sanierungsmaßnahme mit Austausch des Kanalrohres oder ein Neubau geplant ist.
- **Baumzustand:** Die vorhandenen Bäume müssen das angestrebte Entwicklungsziel des Standortes erreichen können. Dies schließt die aktuelle und zukünftige Wurzelausbreitung ein, was im Einzelfall mit Hilfe von Suchschachtungen zu überprüfen ist.
- **Bodenbeschaffenheit:** Der aktuelle Zustand des Bodens muss hinsichtlich der Versickerungsfähigkeit analysiert werden. Es wird die Erstellung eines Bodengutachtens empfohlen.
- **Entwässerungssysteme:** Vorhandene Entwässerungssysteme werden überprüft, um herauszufinden, wie das BRS angeschlossen werden kann.
- **Grundwasserstand:** Da der Leitungsgraben bzgl. einer Versickerung grundsätzlich wie eine Rohrrigole funktioniert, ist ein ausreichender Grundwasserflurabstand von ≥ 1 Meter gemäß DWA-A 138-1 (2024b) einzuhalten. Das System ist auf eine ausreichende Versickerung angewiesen, weshalb Standorte mit zu hohem Grundwasserstand ungeeignet sind.
- **Leitungsbestand:** Die bestehenden (Versorgungs-)Leitungen im Straßen- und im Gehwegbereich müssen genau dokumentiert werden, um Konflikte bei der Ausführung des Leitungsgrabens, des Übergangsbereiches und des Baumstandortes zu vermeiden.
- **Niederschlagsbelastung:** Für die Dimensionierung des BRS und den Nachweis der Leistungsfähigkeit (z. B. Überstau und Überflutung nach dem DWA-A 118 (2024a) sind entsprechende Niederschlagsbelastungen festzulegen, die z. B. über den KOSTRA-DWD-2000 deutschlandweit zur Verfügung stehen (openko.de, 2023).
- **Qualität des Niederschlagswassers:** Die Qualität des einzuleitenden Niederschlagswassers ist nach verschiedenen Gesichtspunkten zu bewerten. Hinsichtlich der Versickerung sind die entsprechenden Vorgaben nach dem DWA-A 138-1 (2024b), bzgl. der Baumstandorte die Anforderungen der FFL-Richtlinie „Empfehlungen für Baumpflanzungen“, Teil 2 (2010) zu berücksichtigen. Es ist mit der jeweiligen Genehmigungsbehörde abzustimmen, ob eine Versickerung von Dachwässern über die Pflanzgrube eine hinreichende Vorbehandlung darstellt. Für die Einleitung von Niederschlagswasser von Straßenoberflächen sind technische Behandlungsmaßnahmen (DIBt-geprüft) wie bei einer „klassischen“ Rigolenversickerung vorzusehen.

- **Salzeintrag:** Eine Herausforderung für das BRS stellt der Eintrag von Streusalz dar, da dieses den Bäumen erheblich schaden kann. Um Schäden zu vermeiden, sollten die Baumstandorte im Frühjahr vor dem Austrieb gründlich durchgespült werden (eine genau Abschätzung dieses Zeitpunktes ist jedoch schwierig). Als eine weitere Option könnte auch ein Winter- und Sommerbetrieb des BRS in Betracht gezogen werden, bei dem im Winter das Niederschlagswasser in ein bestehendes Kanalnetz eingeleitet wird. Die Projektauswertungen haben gezeigt, dass es aufgrund milderer Winter zunehmend seltener zu Frost kommt und entsprechend weniger gestreut wird. Darüber hinaus gibt es bereits Straßen, die nicht mehr mit Streusalz behandelt werden, was die Belastung für das BRS reduziert. Generell sollte jedoch der mögliche Eintrag durch Streusalz in das BRS beachtet werden.
- **Tiefenlage der Leitungszone:** Oberhalb des Leitungsgrabens befindet sich der Straßenoberbau, dessen Mächtigkeit u.a. von der Belastungsklasse abhängt. Bei der im Projekt untersuchten Belastungsklasse 3,2 beträgt die Gesamtdicke des Straßenoberbaus zwischen 45 bis 75 cm. Die Überdeckungsschicht zwischen Straßenoberbau und Leitungsgraben / Steinwollelement muss mindestens 30 cm betragen, sodass sich die Oberkante des Leitungsgrabens zwischen 75 und 105 cm unter Geländeoberkante befindet (siehe Kapitel 4.1). Die Mindesthöhe der Steinwollelemente beträgt 50 cm (siehe Kapitel 4.4.3) und die der Sandschicht 15 cm (siehe Abbildung 5). Die Oberkante der Leitungszone liegt somit in einer Mindesttiefe von 1,40 m, bei großzügigeren Dimensionierungen entsprechend tiefer.
- **Topografie:** In flachen und nur leicht geneigten Geländeabschnitten kann das BRS problemlos umgesetzt werden. Bei starkem Gefälle ist ggfs. eine kaskadenförmige Anordnung der Steinwollelemente erforderlich, um eine gleichmäßige Verteilung und Versickerung des Wassers zu ermöglichen.

4 Planung und Dimensionierung

Für die erfolgreiche Planung und Umsetzung des BRS ist eine enge Zusammenarbeit mit Fachleuten unterschiedlicher Disziplinen unerlässlich. Insbesondere die Einbindung von Expert:innen zu den eingesetzten Materialien duktile Gussrohre (EADIPS/ FGR) und Steinwolle (ROCKWOOL Rainwater System) wird empfohlen, um das System auf Basis fundierter technischer Expertise zu gestalten. Eine Einbauanleitung für BRS-Elemente im Leitungsgraben wird in Kapitel 4.4.4 gezeigt.

Um die Belange der Bäume (insbesondere Stadtbäume) und Standorte ausreichend zu berücksichtigen, ist ein Baumökologe hinzuzuziehen. Außerdem ist sicherzustellen, dass Dritte, die durch diese Baumaßnahme betroffen sind, bereits frühzeitig in den Planungsprozess eingebunden werden, um unnötige Kosten und Konflikte zu vermeiden. Hierzu gehören u. a. Straßenplaner, Untere Wasserbehörden und zuständige Personen für die Ver- und Entsorgungsleitungen (siehe auch Kapitel 6).

4.1 Belastungsklasse der Straße/ In-situ Feldversuche

Die Belastungsklasse (Bk) der Straße ist ein zentraler Faktor bei der Planung des BRS, da sie die Tragfähigkeit des Systems unter Verkehrsbelastung bestimmt. Im Rahmen von Voruntersuchungen ist es daher wichtig, die Belastungsklasse zu bestimmen, für die das System ausgelegt werden soll. Die Belastungsklasse hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie zum Beispiel dem Achszahlfaktor, dem Lastkollektivquotienten und dem Fahrstreifenfaktor. Tabelle 2 bietet eine Übersicht über typische Entwurfssituationen und zugehörige Belastungsklassen. Abbildung 6 zeigt den Aufbau und die Schichtdicken des Straßenoberbaus zu diesen Belastungsklassen.

Tabelle 2: Mögliche Belastungsklassen für die typischen Entwurfssituationen nach Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV, 2012)

Typische Entwurfssituation	Straßen-kategorie	Belastungs-klasse
Anbaufreie Straße	VS II, VS III	Bk10 bis Bk100
Verbindungsstraße	HS III, HS IV	Bk3,2/Bk10
Industriestraße	HS IV, ES IV, ES V	Bk3,2 bis Bk100
Gewerbestraße	HS IV, ES IV, ES V	Bk1,8 bis Bk100
Hauptgeschäftsstraße	HS IV, ES IV	Bk1,8 bis Bk10
Örtliche Geschäftsstraße	HS IV, ES IV	Bk1,8 bis Bk10
Örtliche Einfahrtsstraße	HS III, HS IV	Bk3,2/Bk10
Dörfliche Hauptstraße	HS IV, ES IV	Bk1,0 bis Bk3,2
Quartiersstraße	HS IV, ES IV	Bk1,0 bis Bk3,2
Sammelstraße	ES IV	Bk1,0 bis Bk3,2
Wohnstraße	ES V	Bk0,3/Bk1,0
Wohnweg	ES V	Bk0,3

Zeile	Belastungsklasse	Bk100				Bk32				Bk10				Bk3,2				Bk1,8				Bk1,0				Bk0,3			
	B [Mio.]	> 32				> 10 - 32				> 3,2 - 10				> 1,8 - 3,2				> 1,0 - 1,8				> 0,3 - 1,0				≤ 0,3			
	Dicke des frostsich. Oberbaus[1]	55	65	75	85	55	65	75	85	55	65	75	85	45	55	65	75	45	55	65	75	45	55	65	75	35	45	55	65
1	Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht																												
	Asphaltdecke	12				12				12				10				4				4				4			
	Asphalttragschicht	▼120	22	Σ34		▼120	18	Σ30		▼120	14	Σ26		▼120	12	Σ22		▼120	16	Σ20		▼120	14	Σ18		▼100	10[6]	Σ14	
	Frostschutzschicht	▼45				▼45				▼45				▼45				▼45				▼45				▼45			
	Dicke der Frostschutzschicht	-	31[2]	41	51	25[3]	35	45	55	29[3]	39	49	59	-	33[2]	43	53	25[3]	35	45	55	27	37	47	57	21	31	41	51

Abbildung 6: Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht (FGSV, 2012)

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die Pilotprojekte ausschließlich in Straßen der Belastungsklasse 3,2 (Wohnwege, Wohnstraßen, Quartierstraßen, Hauptgeschäftsstraßen und ähnliche Verkehrswege) geplant. In Abbildung 7 ist beispielhaft der Aufbau einer befestigten Straße inklusive des Straßenoberbaus und des darunter anstehenden Planums dargestellt. Aus den Anforderungen des Straßenbaus RStO (Forschungsgesellschaft für Straßen- und

Verkehrswesen (FGSV), 2012) geht u. a. hervor, dass in Höhe des Planums ein Verformungsmodul von $E_{v2} \geq 45$ MN/m² nachgewiesen werden muss, um eine ausreichende Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Straße sicherstellen zu können. In Anbetracht der Steifigkeit der Steinwolle ist es zur Lasteneinleitung erforderlich, eine ausreichend mächtige Überdeckungsschicht aus geeignetem, tragfähigen Bodenmaterial zwischen der Steinwolle und dem ungebundenen Straßenoberbau anzuordnen, um die o. g. Forderungen einzuhalten.

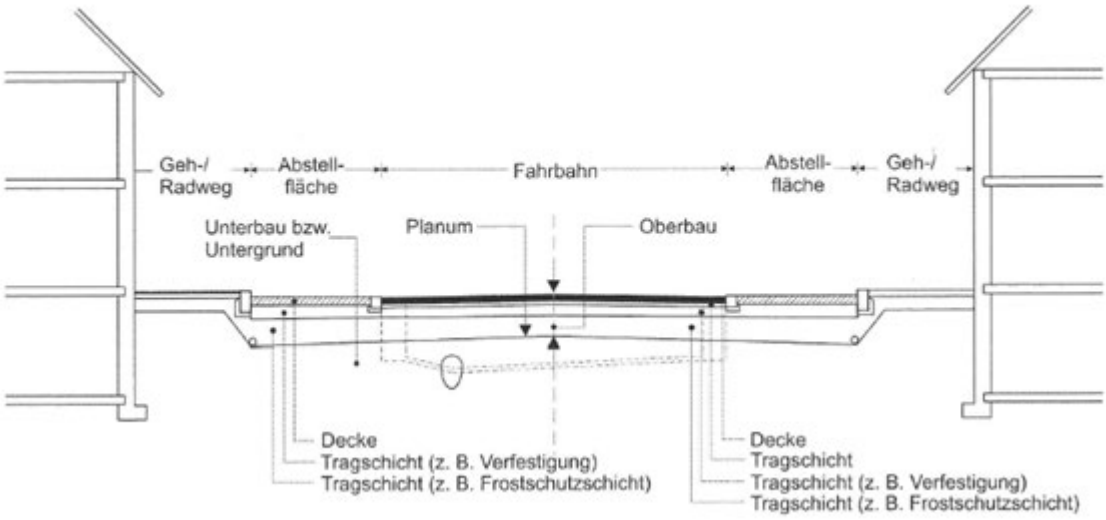


Abbildung 7: Beispielhafter Aufbau einer befestigten Straße (FGSV, 2012)

Zur Festlegung der Überdeckungsmächtigkeit und der Zusammensetzung des Überdeckungsmaterials wurden mit Hilfe von in-situ Feldversuchen überprüft, ob und wie der erforderliche Verformungsmodul von $E_{v2} \geq 45$ MN/m² nach Einbau der Steinwolle erzielt werden kann.

Dafür wurden in-situ Probefelder angelegt, in denen 1,0 m hohe Steinwollelemente (WM 2005) im gesättigten Zustand eingebaut und mit einem Mineralstoffgemisch mit unterschiedlichen Mächtigkeiten der Überdeckungsschicht zwischen d = 0,30 m bis d = 1,25 m überbaut wurden. Für die Überprüfung der Tragfähigkeit im Hinblick auf die RStO wurden jeweils auf der obersten Schüttlage der Überdeckungsschicht statische Lastplattendruckversuche durchgeführt.

Die Versuchsergebnisse (Tabelle 3) zeigen, dass für alle untersuchten Probefelder die Anforderungen hinsichtlich des erforderlichen Verformungsmoduls von $E_{v2} \geq 45$ MN/m² erfüllt sind. Dieser Wert wird bereits bei einer Schichtmächtigkeit von 30 cm erreicht. Bei einer Mächtigkeit der Überdeckungsschicht von ≥ 50 cm liegt der Verformungsmodul in einer Größenordnung von $E_{v2} \geq 100$ MN/m².

Tabelle 3: Versuchsergebnisse für die Steinwollvariante WM 2005

Versuchsergebnisse der statischen Lastplattendruckversuche für die Steinwollvariante WM 2005		
Feld	Dicke der Überdeckungsschicht [cm]	Verformungsmodul E_{v2}* [MN/m²]
1	30	78,6
2	50	101,65
3	75	174,8
4	100	195,9
5	125	228,2
*Die Versuchsergebnisse wurden gemittelt. Insgesamt wurden pro Feld 2 statische Lastplattendruckversuche durchgeführt.		

Die Ergebnisse der Felduntersuchungen zeigen, dass eine Überdeckungsschicht mit einer Schichtmächtigkeit von 0,3 m aus tragfähigem Mineralstoffgemischen eine ausreichende Tragfähigkeit im Hinblick auf den Straßenbau gewährleistet und somit eine grundsätzliche Anwendung des Systems ermöglicht. Im Rahmen der Verdichtungskontrollen und der Qualitätssicherung auf der Baustelle sollten bevorzugt statische Lastplattendruckversuche eingesetzt werden. Aufgrund der Anforderungen der RStO variiert die erforderliche Mächtigkeit der Frostschutzschicht je nach Bemessungssituation, wodurch die Oberkante des Leitungsgrabens zwischen 75 cm und 105 cm unter Geländeoberkante liegt. Dabei müssen zusätzliche Anforderungen wie der Verformungsmodul (E_{v2}) und das Verhältnis E_{v2}/E_{v1} erfüllt werden.

In der Literatur findet sich eine Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Tragschicht und der zur Erhöhung der Tragschicht erforderlichen Dicke der Gesteinskörnung (Floss, 2019). Ein Untergrund von 10 MN/m² erfordert beispielsweise eine Dicke der Gesteinskörnung von 0,45 m, um die für den Unterbau erforderlichen 45 MN/m² zu erreichen (Abbildung 8). In der Abbildung zeigen die orangefarbene und die graue Linie eine Tragschicht mit einem Verformungsmodul von 10 MN/m² bzw. 20 MN/m² und den Zusammenhang mit dem verdichteten Zuschlagstoff, der erforderlich ist, um die Anforderung von E_{v2} = 45 MN/m² für die Tragschicht (Planum) zu erfüllen (Floss, 2019). Die blaue gestrichelte Linie stellt die gemessene Korrelation zwischen dem Verformungsmodul und der Dicke der verdichteten Gesteinskörnung auf Steinwolle (WM 2005) dar. Eine genaue Abstimmung sollte standort-spezifisch erfolgen.

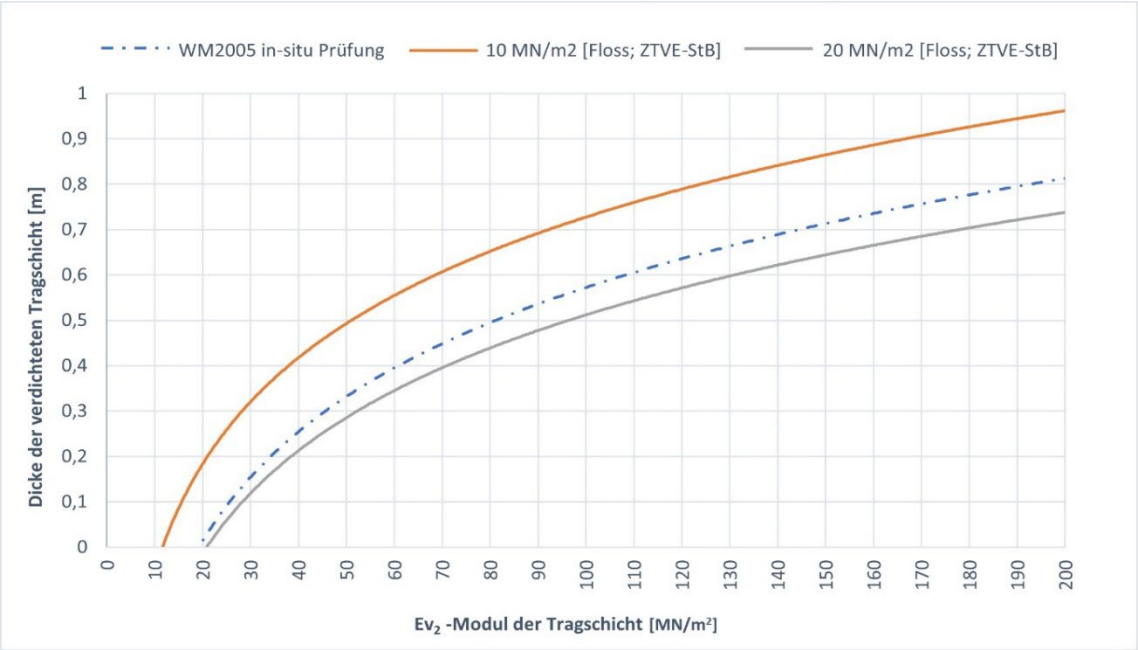


Abbildung 8 Diagramm zur Bestimmung des Verformungsmoduls E_{V2} für verschiedene Gesteinsschichtdicken

Es wird darauf hingewiesen, dass im Rahmen des Projekts keine Langzeituntersuchungen zur Tragfähigkeit durchgeführt wurden, welche zusätzlich zu den statischen Einwirkungen insbesondere Einflüsse aus dynamischen und zyklischen Belastungen infolge von PKW- und ggf. LKW-Überfahrten auf das Tragverhalten des Verbundsystems Steinwolle-Boden-Überdeckungsschicht erfassen.

4.2 Dimensionierungen

Für die Dimensionierung des Niederschlagswasserspeicher des BRS wurde eine Dimensionierungsvorschrift entwickelt. Die dahinterstehenden Annahmen werden im Kapitel 4.2.1 beschrieben. Aufgrund ihres Umfangs wird diese in einem eigenen Anhang ausgegliedert. Der durch das BRS zur Verfügung gestellte erweiterte Wurzelraum für Neupflanzungen und Bestandsbäume wird auf Grundlage der Faustformel von Bakker/ Kopinga (Kapitel 4.2.2) dimensioniert.

4.2.1 Niederschlagswasserspeicher des BRS

Eine häufig gestellte und bisher nicht hinreichend beantwortete Frage im Zusammenhang mit der Dimensionierung von Baumrigolen ist die Reduzierung des Speicher- (Poren-) Raums durch den Wurzeleinwuchs. Grundsätzlich sind der Speicher für das Niederschlagswasser und der Wurzelraum voneinander getrennt. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass auch in den Grobporen des Wurzelraums Wasser gespeichert werden kann.

In der Dimensionierungsvorschrift für das BRS wird deshalb folgender Ansatz gewählt: Es wird davon ausgegangen, dass im Laufe der Zeit Pflanzgrube, Übergangszone zum Leitungsgraben und ein Teil des Leitungsgrabens auf der Länge des Übergangsbereichs vollständig

durchwurzelt werden (rot markierte Bereiche in Abbildung 9). Diese Bereiche werden daher bei der Dimensionierung des Niederschlagswasserspeichers des BRS nicht berücksichtigt. Für das außerhalb des roten Bereichs, zwischen zwei Übergangszonen liegende BRS, erfolgt eine Betrachtung der in der nachfolgenden Aufzählung aufgeführten Größen pro laufenden Meter BRS. In der Praxis werden und sollen sich die Wurzeln über den rot markierten Bereich im Wurzelraum des BRS (erweiterter Wurzelraum) ausbreiten. Gleichzeitig werden die Porenräume im rot markierten Bereich nicht vollständig von Wurzeln durchdrungen. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese beiden Effekte weitgehend ausgleichen.

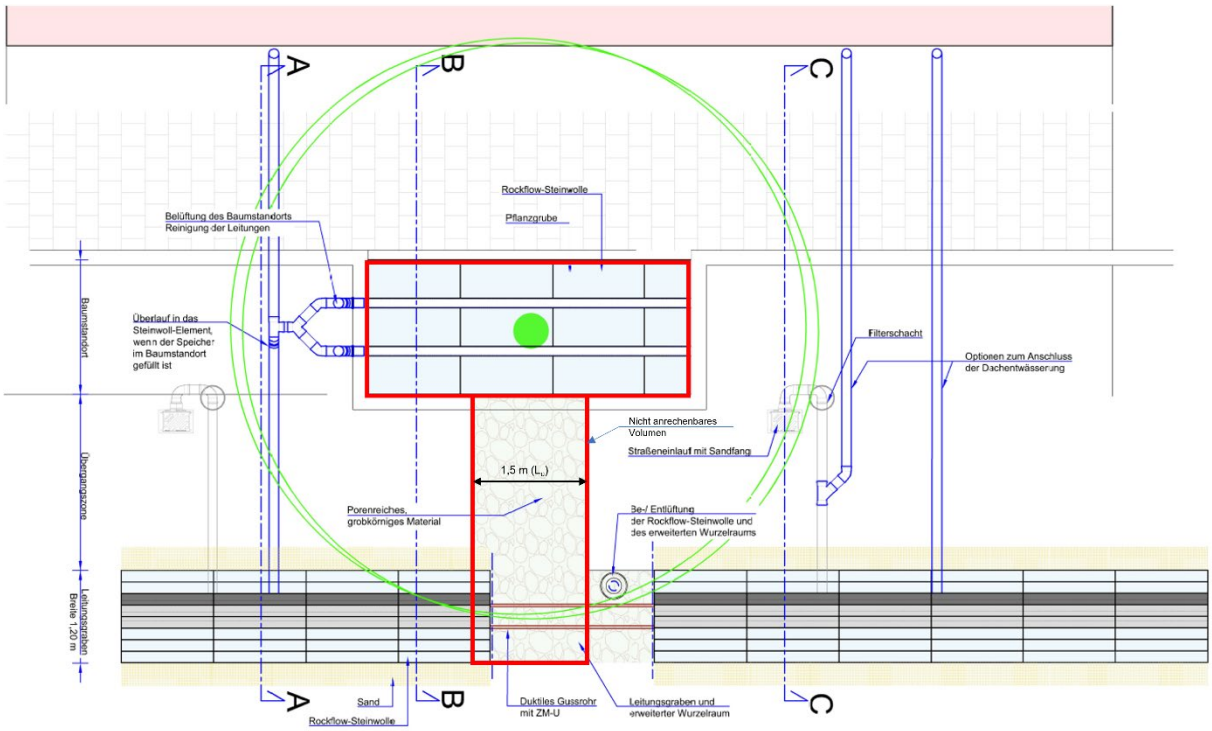


Abbildung 9 Bei der Dimensionierung des BRS nicht berücksichtigte Bereiche (rot markiert)

Die Dimensionierungsvorschrift gliedert sich grob in die folgenden Arbeitsschritte. Diese werden, wie zuvor beschrieben, zunächst pro laufenden Meter BRS ermittelt: Außerdem werden die genannten Größen exemplarisch für einen Straßenabschnitt berechnet, bei dem ein Abstand von 20 m zwischen zwei Baumstandorten angenommen wird.

- Bestimmung des verfügbaren Speichervolumens im BRS (bestehend aus Steinwollkörper und Leitungszone / Wurzelraum des BRS)
- Angeschlossene Fläche (Gehwege, Straßen, Dach- und Privatflächen)
- Dimensionierung des Niederschlagswasser-Speichers in Abhängigkeit von der zulässigen Niederschlagshöhe
- Dimensionierung des Niederschlagswasser-Speichers in Abhängigkeit von der zulässigen angeschlossenen Fläche

- Für beide Dimensionierungen des Niederschlagswasser-Speichers werden jeweils zwei Rechengänge aufgezeigt, einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung einer Versickerungsleistung des anstehenden Bodens

4.2.2 Dimensionierung des Wurzelraums des BRS

Durch das BRS kann sowohl der Wurzelraum von neu gepflanzten Stadtbäumen als auch der Wurzelraum von Bestandsbäumen erweitert werden. Das Volumen des erweiterten Wurzelraums steht im direkten Zusammenhang zum Bodenvolumen im Leitungsgraben, das für die Niederschlagswasser-Bewirtschaftung geplant wird.

Grundsätzlich setzt sich der Wurzelraum aus drei Bodenvolumina zusammen:

1. Volumen V_{Pg} der Pflanzgrube, mit der nach FLL-Richtlinie (FLL, 2010) mit einer Größe ab ca. 12 m³ für die Anfangsentwicklung in den ersten Standjahren ein ausreichend großer Wurzelraum geschaffen werden kann.
2. Volumen $V_Ü$ des Übergangsbereichs zwischen Pflanzgrube und BRS-System.
3. Volumen V_{eW} des erweiterten Wurzelraums im BRS abzüglich des Volumens V_R des duktilen Gussrohres mit Zementmörtel-Umhüllung.

Die für die Berechnung des Volumens V_{eW} abzuziehenden Volumina V_R der Rohrleitung sind in Tabelle 4 für die Nennweiten 200 bis 800 dargestellt.

Tabelle 4: Nennweiten und Außendurchmesser sowie Volumen pro Meter Rohrleitung für duktile Gussrohre nach EN 598 mit Zementmörtel-Umhüllungen nach EN 15542

DN	Außendurchmesser DE mit ZM-U	Volumen V_R pro Meter Rohrleitung
	[mm]	[m³]
200	232	0,042
250	284	0,063
300	336	0,089
400	439	0,151
500	542	0,231
600	645	0,327
700	748	0,439
800	834	0,546

Bereits in den 1990-er Jahren haben Bakker und Kopinga (Kopinga (1991, 1997)) einen Zusammenhang zwischen der Kronenprojektionsfläche und dem durchwurzelbaren Bodenvolumen für Stadtbäume in Form einer Faustformel hergestellt.

$$V_{dB} \approx (0{,}3\ bis\ 0{,}75) \times A_{Kp} \qquad (4\text{-}1)$$

mit:

V_{dB} = durchwurzelbares Bodenvolumen [m³]

A_{Kp} = Kronenprojektionsfläche [m²]

Der Zusammenhang zwischen Baumgröße und durchwurzelbarem Bodenvolumen auf Grundlage der Formel von Bakker/ Kopinga ist in Abbildung 10 visualisiert.

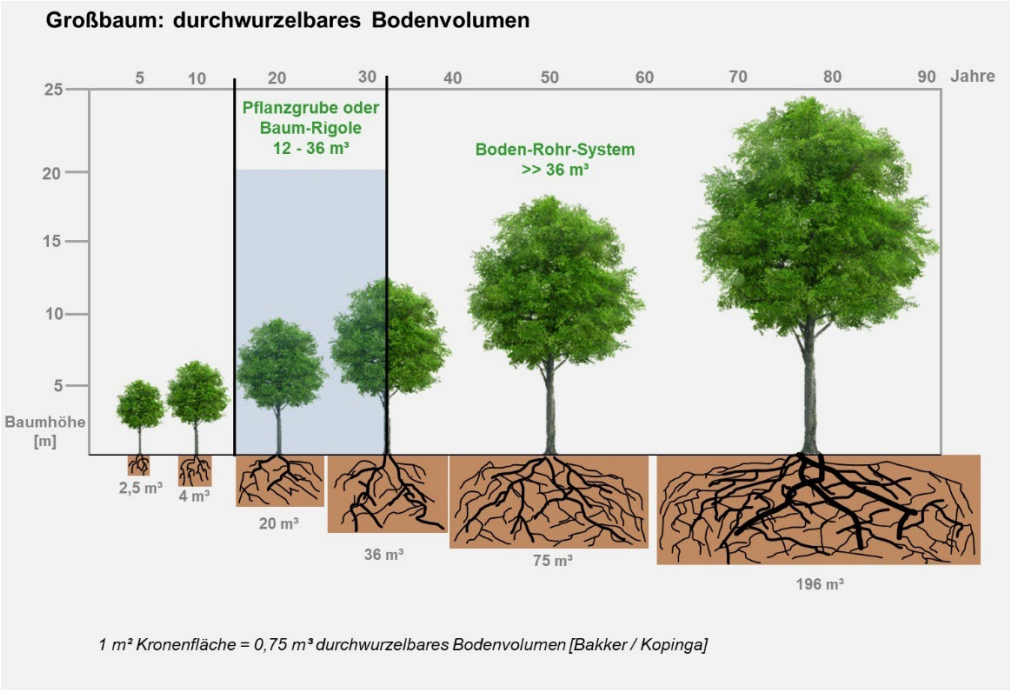


Abbildung 10: Zusammenhang zwischen Baumgröße und durchwurzelbarem Bodenvolumen auf Grundlage der Formel von Bakker/ Kopinga

Erkennbar ist eine vergleichsweise große Schwankungsbreite von 0,3 bis 0,75 mal der Kronenprojektionsfläche. Dieser Umstand nimmt unter anderem auf die Eigenarten und Ansprüche unterschiedlicher Baumarten sowie auf unterschiedliche Bodeneigenschaften Rücksicht – Faktoren also, die maßgeblichen Einfluss auf das einem Baum zur Verfügung stehende, durchwurzelbare Bodenvolumen haben.

Werden dabei die Extreme außer Acht gelassen, so beispielsweise Böden mit einem hohen Skelettanteil, der nicht durchwurzelbar ist, oder vergleichsweise verschwenderisch mit Wasser umgehenden Baumarten, wie z. B. Pappeln, erscheint als Ziel- und damit Planungsgröße für ein durchwurzelbares Bodenvolumen V_{dB} in Höhe von

$$V_{dB} = V_{Pg} + V_{Ü} + V_{eW} \approx 0{,}75 \times A_{Kp} \qquad (4\text{-}2)$$

im Rahmen des BoRSiS-Projekts als erstrebenswert.

4.3 Auswahl der Baumarten

Für die Auswahl geeigneter Baumarten, die sich für die Bedingungen des BRS eignen, sind unter anderem die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Toleranz gegenüber städtischen Umgebungen (Stadtklima Resistenz, Zukunftsbaumarten).
- Der gewünschte Nutzen der Bäume (unter anderem: Begrünungsziel, Schattenspender, Luftreinigung, etc.).
- Eine Anpassung an standörtliche Aspekte (ist der Standort z. B. trocken oder nass).
- Der Trockenstress und die Frosthärte, die der Baum mitbringen sollte.

Die Aspekte sind ebenfalls Teil der Kriterien, wie sie die Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2010, 2015) für Baumpflanzungen empfiehlt. Hinweise zu den Bäumen können unter anderem der Straßenbaumliste der Deutschen Gartenamtsleiterkonferenz (GALK) e.V. (2021), der Datenbank Citree (Technische Universität Dresden, o. J.) und dem Projekt „Stadtgrün 2021 (Bayrische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, 2021) entnommen werden. Diese Informationen stehen im Internet unter folgenden Adressen zur Verfügung:

https://www.galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste/

https://citree.de/

https://lwg.bayern.de/landespflege/urbanes_gruen/284928/index.php

4.4 Ausführung des Boden-Rohr-Systems: Baumaßnahme im Detail

Beim BRS handelt es sich um eine Baumaßnahme in offener Bauweise bei der ein Leitungsgraben mit einem bereits vorhandenen oder neu zu bauenden Abwasserkanal (Misch-, Schmutz- oder Niederschlagswasser) im Sinne einer Mehrfachnutzung zusätzlich als Speicher für Niederschlagswasser und als Wurzelraum genutzt wird. Der Aufbau dieses linienförmigen Bauwerks entspricht im Grundsatz dem Aufbau mit Bettungstyp 1 nach EN 1610 (Abbildung 11).

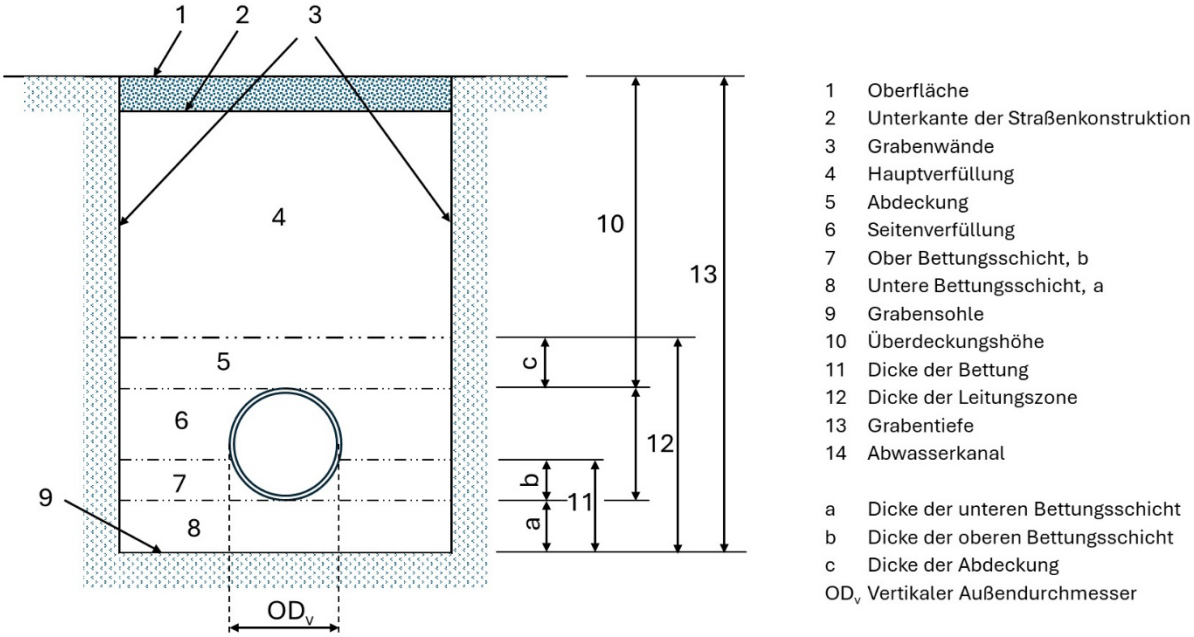


Abbildung 11 Aufbau und Elemente eines Leitungsgrabens Bettungstyp 1 nach EN 1610

Die ordnungsgemäße Ausführung der BRS-Bauweise ist entscheidend, um die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems sicherzustellen. Im Folgenden werden die wesentlichen Empfehlungen für die Installation und Umsetzung beschrieben:

- **Abstände und Verfüllung:** Es wird empfohlen, einen seitlichen Abstand von mindestens 0,3 m auf beiden Seiten der Steinwollelemente einzuhalten. Nach der Positionierung erfolgt die Verfüllung mit Sand, der sorgfältig eingebracht und anschließend mit einem Stampfer verdichtet wird. Diese Maßnahme dient der dauerhaften Stabilisierung des Systems.
- **Einsatz eines Verbausystems:** Sofern erforderlich, ist ein Verbausystem zu verwenden, um die Stabilität der Baugrube während der Arbeiten sicherzustellen. Dies gewährleistet sowohl die Sicherheit als auch die exakte Positionierung des BRS.
- **Positionierung der Steinwollelemente:** Für die Installation der Steinwolle wird die Verwendung eines Baggers mit Palettengabel dringend empfohlen. Dieses Gerät ermöglicht eine Platzierung der Elemente in der vorbereiteten Grube, anschließend werden die Elemente manuell platziert.
- **Umgang mit dem Baum und Baumsubstrat:** Besondere Aufmerksamkeit ist dem Baum zu widmen, der im Rahmen der Maßnahme gepflanzt und für den ein Standort hergerichtet werden muss. Diese sollten den Standards der „guten gärtnerischen Praxis“ unterliegen, also der Einhaltung von national und international anerkannten Grundsätzen im Garten und Landschaftsbau (Universität Hohenheim, 2022). Beispiele sind etwa die Empfehlungen für Baumpflanzungen (Teil 1 und 2) der FLL (2010, 2015) und die DIN 18916:2016-06 (Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), 2016a). Das umgebende Baumsubstrat darf keinesfalls überverdichtet werden, da das BRS seine

Funktion andernfalls nicht erfüllen kann. Eine lockere und durchlässige Struktur des Substrats ist essenziell, um die uneingeschränkte Wasseraufnahme und -verteilung sicherzustellen.

4.4.1 Rohrsysteme

Die Anforderungen an Rohrsysteme lassen sich in drei wesentlichen Punkten zusammenfassen. Rohrsysteme müssen dicht, tragfähig und dauerhaft sein. Dies gilt in gleicher Weise auch für die im BRS eingesetzten Rohrsysteme.

Bei der Auswahl ist zu beachten, dass die Rohre, Anbohrsättel und Hauanschlussleitungen besonderen Belastungen ausgesetzt werden. Zum einen werden die Rohre in Grobschotter gebettet, was Auswirkungen auf die Tragfähigkeit bzw. das Tragverhalten hat. Zum anderen dient der Grobschotter gleichzeitig als Wurzelraum, sodass Rohrsysteme nachweislich wurzelfest sein müssen. Unter Einbeziehung des FGSV-Merkblatt 939 (2013), das textgleich auch als DWA-Merkblatt M 162 und als DVGW-GW 125 erschienen ist, werden beim BRS-System die in allen drei Regelwerken beschriebenen aktiven und passiven Schutzmaßnahmen berücksichtigt. Als passive Schutzmaßnahme wird ein Rohrsystem aus duktilem Gusseisen mit wurzelfesten Rohrverbindungen eingesetzt. Als aktive Schutzmaßnahme dient der Leitungsgraben als Wurzelgraben und als erweiterte Pflanzgrube. Die Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit der duktilen Gussrohre wird zudem durch eine Zementmörtel-Umhüllung sichergestellt, die es ermöglicht, die Wurzelräume in einer Rohrbettung mit grobem Schotter zu schaffen.

Duktile Guss-Rohrsysteme werden im Europäischen Komitee CEN / TC 203 „Gussrohre, Formstücke und deren Verbindungen“ genormt. Die Mitglieder des Komitees haben frühzeitig damit begonnen, die Regeln für Schwammstadtanwendungen zu entwickeln. Dies geschah auch im Hinblick auf die europaweite Umsetzung der im BoRSiS-Projekt entwickelten Bauweisen mit duktilen Gussrohren. Dazu gehören:

- **DIN EN 598:** Rohre aus duktilem Gusseisen und zugehörige Komponenten für die Abwasser-Entsorgung – Anforderungen und Prüfverfahren, 2009-10 (Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), 2009)
- **EN 15542:** Rohre, Formstücke und Zubehör aus duktilem Gusseisen – Zementmörtelumhüllung von Rohren – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche und Englische Fassung prEN 15542, 2022-02 Entwurf (Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), 2022)
- **DIN EN 17970:** Rohre aus duktilem Gusseisen – Steckmuffen-Verbindung für Rohrsysteme aus duktilem Gusseisen – Widerstandsfähigkeit gegen Wurzeldurchdringung – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 17970, 2024-08 (Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), 2024)

Zudem wurde die Entwicklung eines technischen Regelwerks für Schwammstadt-Anwendungen in das Arbeitsprogramm des CEN/TC 203 beim DIN aufgenommen.

4.4.2 Niederschlagswasser-Speicherelemente allgemein

Grundsätzlich können für die Speicherung des Niederschlagswassers unterschiedliche Materialien eingesetzt werden, solange sie die Kriterien für einen Speicher-/ Versickerungskörper im BRS gemäß Tabelle 5 erfüllen.

Tabelle 5: Anforderungen für die Auswahl der Speicher-/ Versickerungskörper

Hauptkriterien für Speicherelemente im BRS		**Sekundäre Kriterien für Speicherelement im BRS**	
i.	Großes Volumen für die Speicherung von Niederschlagswasser	v.	Einfacher Einbau in den Graben
ii.	Fähigkeit, sich schnell zu füllen, um so Schäden durch Starkregen zu vermeiden	vi.	Die verwendeten Materialien sind nachhaltig oder naturbelassen
iii.	Möglichkeit der Verwendung unter Straßen und Verkehrsflächen	vii.	Bemessung nach Regelwerken, wobei sowohl eine hydraulische als auch eine volumetrische Bemessung möglich ist
iv.	Passive Versickerung, bei der keine Pumpen/ Energie benötigt wird, um das gespeicherte Wasser in den erweiterten Wurzelraum zu befördern	viii.	Lange Lebensdauer; zudem können Inspektionen und Wartungen durchgeführt werden

4.4.3 Steinwolle (Rockflow) als innovatives dezentrales Entwässerungssystem

ROCKWOOL Rainwater Systems ist Teil der Unternehmensgruppe ROCKWOOL. Rockflow®. Das Produkt Rockflow ist ein von ROCKWOOL hergestelltes, aus vollzirkulärer Steinwolle bestehendes Naturprodukt und repräsentiert ein innovatives, unterirdisches Entwässerungssystem zur Speicherung und Versickerung von Regenwasserabflüssen oder zur Speicherung und Einleitung in Oberflächengewässer. Es besteht aus tragfähigen Steinwollelementen mit einem freiem Wasserspeichervolumen von bis zu 95%. Im Vergleich zu Schotter oder grobem Material mit einem Hohlraumanteil von 30 % bis 40 % (Tabelle 1) weist Rockflow somit einen deutlich höheren Hohlraumanteil auf und erfüllt zudem die in Tabelle 5 dargestellten Kriterien.

Ein Steinwollelement hat die Abmessungen B = 0,15 m, L = 1,2 m und wahlweise Bauhöhen von 1,0 m, 0,5 m oder 0,66 m (Abbildung 12). Die relativ geringe Breite B = 0,15 m eines Einzelelements lässt eine flexible Gestaltung der Gesamtbreite, in Abhängigkeit von der Breite des Leitungsgrabens und des geforderten Speichervolumens, zu.

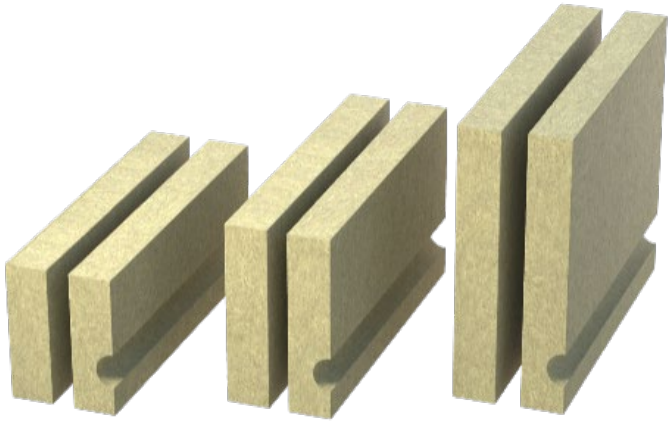


Abbildung 12 Rockflow Steinwollelemente in verschiedenen Bauhöhen

Zur Beschickung des Systems nutzt das System die in der Steinwolle vorgeformten Rohrkanäle (Abbildung 13). Diese haben die Funktion, das Wasser schnell in das System einzuleiten und zu verteilen. Ein zweiter Kanal sorgt für die Entlüftung des Systems.

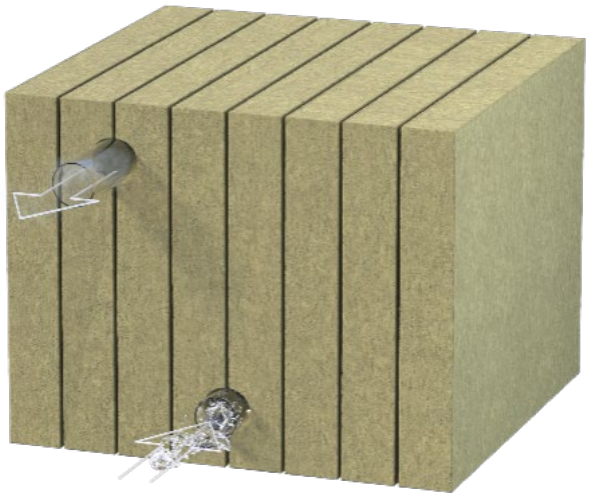


Abbildung 13 Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus mit Rockflow Steinwolle, mit Wasserzufuhr und Entlüftung mittels gefräster Rohrkanäle in der Steinwolle

Eine Anlage wird aus mehreren solcher Steinwollelementen modular aufgebaut, bis das geforderte Speichervolumen realisiert wird. Die Rockflow-Steinwolle ist formfest und druckbeständig und kann daher unterirdisch unter Straßen, Wegen, Parkplätzen, Gehwegen etc. verlegt werden. Rockflow-Produkte werden bereits in verschiedenen Konfigurationen an mehr als 400 Standorten in den Niederlanden und in Dänemark zur Speicherung und Ableitung von Regenwasser eingesetzt.

Rockflow-Systeme zeichnen sich durch ihre hohe Lebensdauer und einfache Wartung aus (siehe auch Kapitel 7 und angehängte Anleitung). Dank der Flexibilität in Design und im Einbau können maßgeschneiderte Lösungen für lokales Regenwassermanagement auch unter anspruchsvollsten Bedingungen umgesetzt werden.

4.4.4 Einbauanleitung für BRS-Elemente im Leitungsgraben

Die nachfolgende Abbildung 14 zeigt schematisch den Einbau der BRS-Elemente im Leitungsgraben.

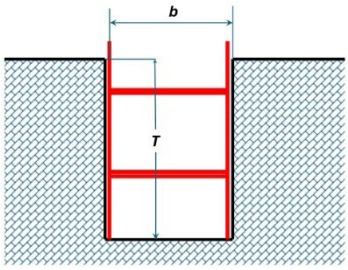
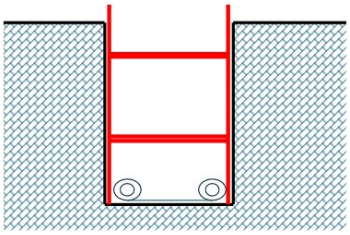
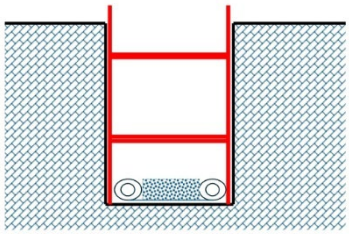
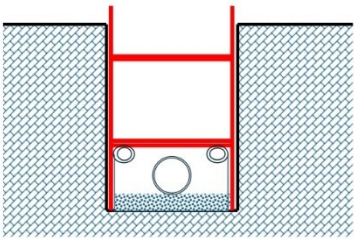
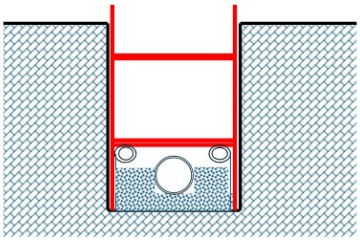
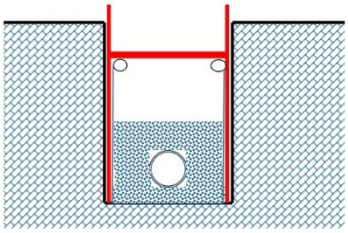
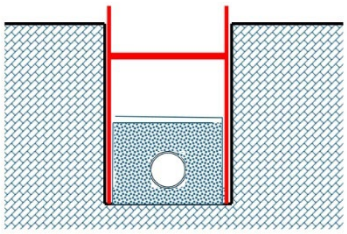
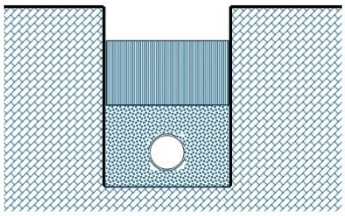
 Bild 1: Rohrgraben mit Verbau		 Bild 3: Grabensohle mit zwei aufgewickelten Geotextilbahnen
Bild 1: Rohrgraben mit Verbau	Bild 2: Geotextilbahn, zu zwei gleichlangen Ballen aufwickeln	Bild 3: Grabensohle mit aufgewickelter Geotextilbahn
 Bild 4: Grobes Bettungsmaterial auf der Geotextilbahn	 Bild 5: Einbau des Rohres	 Bild 6: Einbau des Rohres mit der Seitenverfüllung
Bild 4: Einbau grobes Bettungsmaterial auf der Geotextil-bahn	Bild 5: Hochziehen der Getotextilbahn bis zur ersten Spreizenlage, Einbau grobes Bettungsmaterial und Einbau des Rohres auf der Rohrbettung	Bild 6: Einbau der Seitenverfüllung
 Bild 7: Erste Spreizenlage entfernt, Textilbahnen nach oben gezogen, Rohrüberdeckung eingebaut	 Bild 8: obere Enden der Geotextilbahn übereinander geschlagen	 Bild 9: Verbau gezogen, Einbau desRockwoolfilters
Bild 7: Entfernen der ersten Spreizenlage, hochziehen der Geotextilbahn bis zur zweiten Spreizenlage, Rohrüberdeckung einbauen	Bild 8: Die oberen Enden der Geotextilbahn übereinander schlagen und Übegangsschicht einbauen	Bild 9: Verbau ziehen und Steinwollelemente einbauen

Abbildung 14 Einbau der BRS-Elemente im Leitungsgraben

4.4.5 Niederschlagswasser sammeln und vorbehandeln

Die Nutzung von Niederschlagswasser für die Versorgung von Stadtgrün ist ein wesentliches Element in der Schwammstadt. Auch beim BRS wird Niederschlagswasser

- gesammelt,
- hinsichtlich seiner Behandlungsbedürftigkeit bewertet,
- bei Bedarf vorbehandelt,
- in der Steinwolle gespeichert und
- gedrosselt in den darunter liegenden Wurzelraum versickert,
- um ergänzend, die an den Wurzelraum angeschlossenen Bäume langfristig mit Wasser zu versorgen.

Niederschlagswasser sammeln

Zur Bewässerung der Bäume im BRS kann Niederschlagswasser entweder von Dachflächen und/ oder von Gehweg- und Straßenflächen verwendet werden.

Das Niederschlagswasser von Dachflächen kann entweder direkt oder über eine Zulauf-/ Sammelschacht an das Speicherelement aus Steinwolle angeschlossen werden. Auch die direkte Bewässerung der Bäume über die Baumscheibe ist möglich (siehe Kapitel 2). Für die Dimensionierung der Zulaufleitung und Zulaufleitungen sind die Anforderungen aus der DIN 1986-100 (2016b) zu beachten.

Das Niederschlagswasser von Gehwegen und Straßen wird in Straßenabläufen oder in Rinnenelementen gesammelt, wobei es unterschiedliche Bauformen gibt. Straßenabläufe werden durch einen Aufsatz abgedeckt, der aus einem Rahmen besteht, in dem ein Rost eingelegt wird. Durch den Rost werden Grobstoffe wie Äste oder Abfall zurückgehalten. Je nach Größe und Formgebung besitzen die Straßenabläufe eine unterschiedliche hydraulische Leistungsfähigkeit, welche umgangssprachlich als „Schluckvermögen“ beschrieben wird (Schlenkhoff et al., o.J.). Dieses „Schluckvermögen“ ist bei der Größe der anzuschließenden Fläche zu berücksichtigen.

Weitere Aufsatzformen für Straßenabläufe sind Seitenabläufe und Kombiaufsätze. Rinnenaufsätze zeichnen sich dadurch aus, dass sie das Wasser einer Entwässerungsrinne zuführen. Entwässerungsrinnen können als lineare Entwässerungsgegenstände z. B. entlang des Seitenbords einer Straße oder in Straßenmitte angeordnet werden. Dadurch erhöht sich die hydraulische Leistungsfähigkeit des Niederschlagssammelsystems erheblich. Rinnensysteme werden in unterschiedlichen Baugrößen hergestellt.

Hinweise zur Bemessung von Straßenabläufen und Entwässerungsrinnen finden sich in der REwS – Richtlinien für die Entwässerung von Straßen und in der dazugehörigen Anlage (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2021a und 20121b) sowie bei Schlenkhoff et al. (o.J.).

Niederschlagswasser behandeln

Niederschlagswasser von Straßenflächen, aber auch von Dachflächen ist unterschiedliche stark belastet (Abbildung 15), z. B. durch

- Abgabe von Stoffen aus den verwendeten Werkstoffen des Dachmaterials,
- Erosion und Abfall,
- Reifen- und Straßenabrieb sowie Tropfverluste von Fahrzeugen,
- oder durch Blätter, Blüten und Pollen.

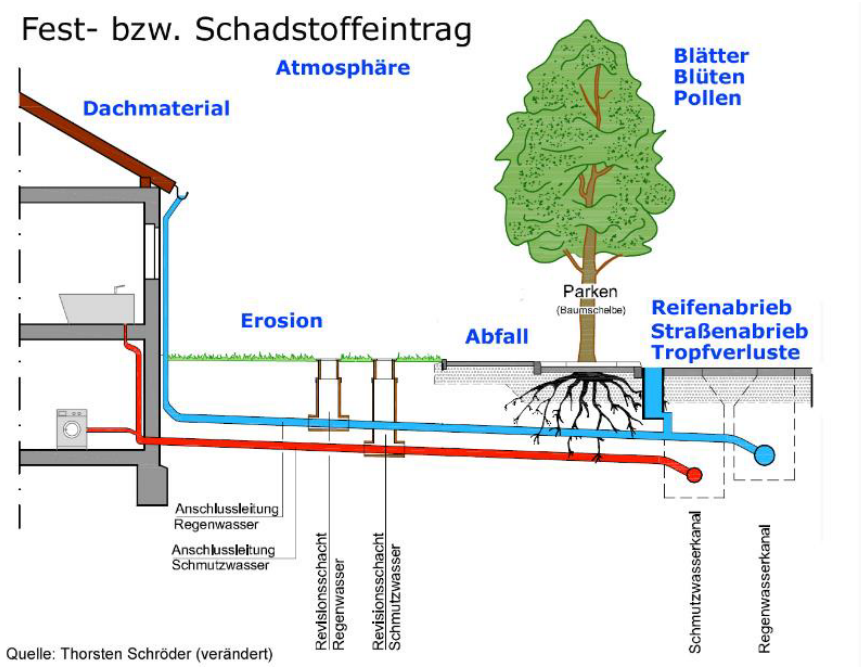


Abbildung 15 Fest- bzw. Schadstoffeintrag über den Eintragspfad Niederschlagswasser

Die Kenntnisse über Art und Umfang der Verschmutzung von Niederschlagswasser sind in den letzten Jahren durch eine Vielzahl von Forschungsvorhaben gewachsen und führte auch zur Überarbeitung von Regelwerken, Verordnungen und Richtlinien. So wurde während der Laufzeit des Projektes ein wesentliches Regelwerk überarbeitet. Das Arbeitsblatt DWA-A 138-1 „Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser – Teil 1: Planung, Bau, Betrieb“ (DWA, 2024b) wurde im Oktober 2024 veröffentlicht. Im Zuge der Überarbeitung wurde insbesondere das Risiko für das Boden- und Grundwasser durch die Versickerung von Niederschlagswasser von Dachflächen neu bewertet. In einer Fußnote wurde die Entscheidung über die Behandlungsbedürftigkeit des Dachwassers auf die Genehmigungsbehörden übertragen. Es ist daher jeweils individuell mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen, in welchem Umfang für das Niederschlagswasser von Dachflächen bei einer unterirdischen Versickerung eine Vorbehandlung vorzusehen ist. Dabei ist insbesondere zu klären, ob eine technische Niederschlagswasserbehandlungsanlage erforderlich ist, oder ob eine Durchströmung des Bodensubstrates am Baumstandort als hinreichend bewertet wird.

Eine Übersicht über Niederschlagswasserbehandlungsanlagen zur Vorbehandlung von Niederschlagswasser vor der Einleitung in Gewässer sowie für den hier relevanten Fall, bei der Einleitung in Boden- und Grundwasser, wurde 2024 vom Umweltbundesamt (UBA) als Anlage E zum Abschlussbericht „Entwicklung eines Laborprüfverfahrens zum Rückhalt von partikulären Stoffen in dezentralen Niederschlagsbehandlungsanlagen bei Einleitung in Oberflächengewässer“ (UBA, 2024) veröffentlicht.

In diesem Bericht wird unterschieden, zwischen

- Sedimentationsanlagen (Anlagen ausschließlich mit Sedimentationsraum),
- Sedimentationsanlagen mit erweiterter Sedimentation bzw. Dichtetrennung z. B. mittels eingebauter Lamellen oder Hydrozyklone und
- Anlagen mit Filter zum Feststoffrückhalt und/oder zum Rückhalt gelöster Stoffe als erste oder zweite Stufe.

5 Kosten und Nutzen des Systems

Für eine erfolgreiche Umsetzung des Boden-Rohr-Systems müssen nicht nur die rechtlichen und technischen Rahmenbedingungen stimmen, sondern auch die beteiligten Akteure zielführend eingebunden werden. Die Faktoren, die für eine Umsetzung hilfreich sind, werden nachfolgend beschrieben, ebenso wie die Kosten und Nutzen des Systems. Abschließend wird erläutert, welche Optionen es zur Finanzierung gibt.

5.1 Akteure und Rahmenbedingungen

Interviews mit Mitgliedern des Expert:innennetzwerks Baumrigolen, Vertreter:innen anderer bekannter Projekte der blau-grünen Infrastruktur sowie mit den beteiligten Pilotkommunen machten deutlich, dass BRS umso eher umgesetzt werden, je größer der politische Wille ist, je mehr Erfahrungen anderswo bereits gesammelt und verfügbar gemacht wurden und je eingeübter der Wissensaustausch zwischen den handelnden Akteuren ist.

Der **politische Wille** ist nicht notwendigerweise immer gleich vorhanden. Es ist daher sinnvoll, aufmerksam auf sich eröffnende „Windows of Opportunity“ zu achten. So kann die Umgestaltung einer Hauptverkehrsstraße einen Anknüpfungspunkt bieten, das BRS frühzeitig mitzudenken.

Ebenfalls ist die Bereitschaft größer, Elemente der blau-grünen-Infrastruktur (wie dem BRS) umzusetzen, wenn in der jüngeren Vergangenheit vor Ort Erfahrungen mit Überschwemmungen gemacht wurden. Vor dem Hintergrund eines ökologischen und fahrradfreundlichen Stadtumbaus lassen sich BRS als passende komplementierende Maßnahmen mitdenken und in allgemeinen kommunalen Kommunikationskonzepten verankern. Die Umsetzbarkeit des BRS steigt ebenfalls, wenn gezeigt werden kann, dass die Mehrkosten eines solchen Systems durch zusätzliche Nutzen zumindest teilweise kompensiert werden können und geeignete Finanzierungskonzepte vorhanden sind. Dadurch kann auch der politische Wille für eine Umsetzung positiv beeinflusst werden.

Die Umsetzungswahrscheinlichkeit einer Maßnahme wie dem BRS erhöht sich mit jedem **weiteren Referenzprojekt**, insbesondere wenn in der Planung, in der Umsetzung und im Betrieb eigene Erfahrungen gemacht werden können. Bislang haben sich die Kommunen in Pilotprojekten überwiegend dazu entschieden, Baumrigolen und BRS über öffentliche Flächen zu beschicken. Dies lässt den Akteur „Privater Kunde“ außen vor, was die Gesamtumsetzung relativ gesehen vereinfacht.

Weitere zentrale Erfolgstreiber sind der **Wissensaustausch und die Kommunikationsfähigkeit zwischen handelnden Akteuren** einer Kommune. Dies gilt insbesondere für große Kommunen, in denen Zuständigkeiten über viele Stellen verteilt sind und die Politik eine Vielzahl von Zielen gleichzeitig zu verfolgen sucht.

Der Einfluss zwischenmenschlicher Kontakte kann damit gar nicht überbewertet werden. Der Pilotpartner Bochum etwa hebt hervor, dass die für die Entwässerung Zuständigen von dem großen Erfahrungsnetzwerk „Klimawerk“ profitierten, das über mehrere Jahre hinweg im erweiterten Ruhrgebiet aufgebaut wurde. Dieser immer wieder stattfindende Austausch sowohl mit Mitarbeitenden anderer Ämter der Stadt als auch mit anderen Städten sei eine zentrale Grundbedingung für eine tendenziell positive Grundeinstellung neuer Ansätze der Regenwasserbewirtschaftung gegenüber in der Stadt gewesen. Solche Vernetzungen auch in anderen Regionen Deutschlands ebenfalls zu begründen, wird dringend empfohlen.

5.2 Kosten und Nutzen

Im Vergleich zu herkömmlichen Systemen entstehen Mehrkosten insbesondere bei den Erdbauarbeiten, da für den Einbau der Steinwolle zumindest im oberen Grabenbereich eine größere Grabenbreite (im Beispiel der Standardskizze 1,6 m) benötigt wird als dies für den Einbau eines Abwasserkanals erforderlich ist (bei einer DN 300 Rohrleitung je nach Grabentiefe 0,9 m bis 1,0 m nach DIN EN 1610 (2015)). Auch der Erdaushub für die Übergangszone mit einer Mindestbreite von 1,5 m zwischen dem Leitungsgraben und dem Baumstandort fällt zusätzlich an. Wenn ohnehin Baumaßnahmen im Straßenbereich oder an einem Kanal durchgeführt werden, können die Zusatzkosten für die Umsetzung des BRS daher signifikant reduziert werden.

Weitere Mehrkosten entstehen durch die Materialkosten, insbesondere durch das duktile Gussrohr, die Steinwolle, das grobkörnige, porenreiche Substrat und die Reinigungs- und Belüftungsvorrichtungen. Möglicherweise kommt es wegen der vergrößerten Baumkrone zu höheren Wartungskosten beim Baumschnitt und aufgrund eines höheren Laubanfalls zu einem höheren Reinigungsbedarf.

Kostenreduktionen im Vergleich zu konventionellen Baumstandorten sind hingegen bei der Bewässerung, bei der Beseitigung von Wurzelschäden im Gehwegsbereich und, aufgrund der höheren Baumvitalität, bei selteneren Ersatzpflanzungen zu erwarten.

Die Nutzen des BRS sind einerseits wasserwirtschaftliche Vorteile, die sich durch einen vergrößerten Speicherraum bei Starkregenereignissen und durch eine Annäherung an den

naturnahen Wasserhaushalt (DWA, 2022) ergeben. Zudem ergibt sich eine geringere hydraulische Auslastung des unterhalb liegenden Kanalnetzes, sodass bei einer großräumigen Umsetzung des BRS mit geringeren Kosten bei hydraulischen Sanierungen im unterhalb liegenden Kanalnetz zu rechnen ist. Zudem ergeben sich Vorteile durch die Verbesserung der Standortbedingungen für Stadtbäume.

- verbesserten Anpassung an den Klimawandel, beispielsweise durch eine erhöhte Kühlleistung und Beschattung im Vergleich zu herkömmlichen Baumstandorten
- lokal verbessertes Mikroklima
- erhöhte Artenvielfalt
- verbesserter Stoffrückhalt von Schadstoffen in der Luft

Insgesamt ist zu erwarten, dass zumindest mittelfristig die festgestellten Nutzen die anfallenden Kosten übersteigen werden.

5.3 Finanzierung und Fördermittel

Finanzierung findet ihren Ausgangpunkt immer bei den anfallenden Kosten. Der Bezug zu den Preisen für eine Dienstleistung kann dann tendenziell auf zwei verschiedene Arten erfolgen.

Der auf wettbewerblichen Märkten übliche Ansatz, dass Anbietende Preise für Leistungen in einer Höhe bestimmen, die den Zahlungsbereitschaften der Kunden und der relativen Wettbewerbssituation Rechnung tragen, ist hier nicht sachgerecht. Volkswirtschaftlich und gesamtgesellschaftlich ist es wünschenswert, wenn in einer Region auch nur ein Unternehmen für die Stadtentwässerung zuständig ist. Damit dieses dann aber seine Monopolmacht nicht zu Ungunsten der Bürgerinnen und Bürger, oder allgemein der Nutzenden, ausnutzt, ist eine ex-ante oder ex-post Entgelthöhen- und Entgeltstrukturüberprüfung üblich. Konsens besteht folglich hier, dass Kosten anzusetzen sind, die in Kapitel 5.2 überblicksartig dargelegt wurden.

Zunächst sollten diejenigen die Kosten tragen, die auch vom Nutzen der Anlage profitieren. Dies sind zunächst die Bürger und sonstigen Kunden, für deren Niederschlagsentwässerung gesorgt wird. Neben diesem direkten Nutzen sind mit BRS aber auch indirekte Nutzen (Verbesserung des Mikroklimas sowie der Aufenthaltsqualität, Wasserrückhalt etc.) verbunden. Sie lassen sich in Folge positiver externer Effekte nicht Einzelnen unmittelbar zuordnen, weswegen als erste Handlungsempfehlung festgehalten werden kann, dass eine begleitende Finanzierung auch durch Haushaltsmittel oder Förderung ökonomisch begründbar ist.

Die sich durchsetzende Art, Finanzierungskosten zuzuordnen, ergibt sich aus der Festlegung, welche Funktion das BRS primär verfolgen soll. Diese Herangehensweise ist vergleichsweise pragmatisch und stellt seitens der Pilotkommunen eine jeweils unterschiedlich interpretierte Handlungsweise dar (siehe auch Kapitel 7). Sie kann entweder als Entwässerungsanlage, als hydrologisch optimierter Baumstandort oder als Klimaanpassungsmaßnahme deklariert sein. Gerade das Hervorheben der Funktion der Entwässerung mag in der Folge dazu führen, dass BRS zukünftig schwerpunktmäßig über Niederschlagsgebühren finanziert werden.

Eine aktuelle Fördermöglichkeit bspw. in NRW besteht im Rahmen des Förderprogramms ZunA (NRW Bank, o.J.), das Anpassungen an den Klimawandel fördert, die der Versickerung und Speicherung von Niederschlagswasser dienen. Allerdings wurde das BRS noch nicht in die Liste der förderfähigen Maßnahmen aufgenommen (Stand: Ende 2024). Dies nachzuholen wäre aus dem Projekt heraus zu empfehlen.

6 Genehmigungen

Bevor mit dem Bau des BRS begonnen werden kann, ist es von entscheidender Bedeutung, alle erforderlichen Genehmigungen und Zustimmungen von den relevanten Behörden einzuholen. Um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten und Verzögerungen während der Bauphase zu vermeiden, wird die frühzeitige und umfassende Einbindung der zuständigen Behörden in den Planungsprozess empfohlen.

Nachfolgend werden die Behörden und Stellen aufgelistet, die mindestens in den Planungsprozess eingebunden werden müssen:

- **Grünflächenamt**: Dieses Amt ist für die Bepflanzung und Pflege der urbanen Vegetation zuständig. Es stellt sicher, dass die geplante Infrastruktur in Einklang mit den städtischen Grünflächen und Bäumen steht und dabei keine Schäden an der bestehenden Vegetation entstehen.
- **Untere Wasserbehörde:** Da das BRS in den Wasserkreislauf eingreift, ist die Einbindung der Wasserbehörden notwendig, um sicherzustellen, dass wasserrechtliche Bestimmungen eingehalten werden. Dies betrifft insbesondere die Versickerung von Regenwasser.
- **Tiefbauamt**: Für die Baumaßnahmen im Erdreich, einschließlich der Grabungen und der Installation von Rohrsystemen, ist die Zusammenarbeit mit dem Tiefbauamt erforderlich. Es stellt sicher, dass die Bauarbeiten den infrastrukturellen Anforderungen entsprechen, sodass keine Beeinträchtigung der bestehenden Infrastruktur entsteht.
- **Baulastträger**: Der Baulastträger trägt die Verantwortung für den Bau und die Instandhaltung der betroffenen Grundstücke. Seine Zustimmung ist essenziell, um den Bau des Systems rechtlich abzusichern und die baulichen Verpflichtungen festzulegen.
- **Straßenverkehrsamt**: Für Bauarbeiten, die den Straßenverkehr betreffen oder in der Nähe von Verkehrswegen stattfinden, ist die Zustimmung des Straßenverkehrsamts erforderlich. Dies betrifft insbesondere Absperrungen, Umleitungen und Sicherheitsmaßnahmen während der Bauphase

7 Unterhaltung und Wartung

Die Zuständigkeiten der beteiligten Behörden bei der Unterhaltung und Wartung im Betrieb sollten klar festgelegt und die Aufgaben eindeutig verteilt werden, um eine reibungslose Zusammenarbeit sicherzustellen. Es gibt verschiedene Ansätze zur Aufteilung der Zuständigkeiten, die sich je nach Kommune unterscheiden können. Einige mögliche Modelle, wie sie bereits für Baumrigolen umgesetzt werden, sind nachfolgend aufgeführt:

- **Beispiel Berlin**: Hier übernimmt das Grünflächenamt die Verantwortung im Bereich Unterhaltung, wobei die Finanzierung durch Mittel der Wasserbetriebe (z. B. aus der Niederschlagswassergebühr) erfolgt.
- **Beispiel Leichlingen**: Das Grünflächenamt übernimmt die Pflege des Baums. Der Abwasserbetrieb übernimmt und finanziert die Wartung der übrigen Anlage. Eine interne Verrechnung der Kosten ist möglich.
- **Beispiel Bochum**: Für die unterirdischen Anlagenteile (eines Baumstandortes) ist die Entwässerungsabteilung zuständig, mit Ausnahme der Straßenabläufe, die im Zuständigkeitsbereich des Straßenamts liegen. Der Ankauf des Baums wird durch den Straßenbau finanziert, die Baumpflege allerdings vom Grünflächenamt übernommen.

Neben den Zuständigkeiten sollte auch festgelegt werden, welche Tätigkeiten die Unterhaltung umfasst. Ein umfassender Wartungsplan für das BRS sollte regelmäßig durchgeführte Inspektionen, Unkrautkontrolle und Baumpflege beinhalten. Es wird weiterhin empfohlen, nach bedeutenden Niederschlagsereignissen eine gründliche Überprüfung der Anlagen vorzunehmen, um mögliche Ablagerungen oder Verstopfungen frühzeitig zu erkennen. Zusätzlich sollten regelmäßige visuelle Inspektionen zur Feststellung von sichtbaren Schäden durchgeführt werden. Außerdem werden Inspektionen mittels TV-Kamerabefahrung im Abstand von 2-3 Jahren empfohlen. Es ist ratsam, die Kontrollintervalle klar festzulegen. Diese Maßnahmen gewährleisten eine frühzeitige Identifikation von Problemen und tragen zur langfristigen Effizienz und Funktionalität des Systems bei.

Die Verwendung von chemischen Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmitteln sowie Reinigungsmitteln auf den Flächen, die an Versickerungsanlagen angeschlossen sind, sollte strikt vermieden werden, um die Funktionsfähigkeit und Umweltverträglichkeit der Anlagen zu gewährleisten. Es wird empfohlen, Anlieger:innen über diese Einschränkungen zu informieren und sie auf die ökologischen Auswirkungen solcher Mittel hinzuweisen.

Eine Verstopfung des Steinwollelements kann durch eine regelmäßige Reinigung und Wartung des Systems vorgebeugt werden. Eine Anleitung zur Reinigung des Steinwollelements wird als Anhang beigefügt und ist auch unter dem nachfolgenden Link zu finden:

https://rain.rockwool.com/de/downloads/wartung/?selectedCat=downloads

Um den Gesundheitszustand von Bäumen in Deutschland gemäß den relevanten Richtlinien effektiv zu überwachen, gibt es spezifische Empfehlungen und Leitlinien von der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) und der Gartenamtsleiterkonferenz e.V. (GALK).

Die **FLL-Baumkontrollrichtlinien** bieten detaillierte Anweisungen zur visuellen Inspektion von Bäumen, zur Erfassung und Dokumentation sowie zur Bewertung der Stand- und Bruchsicherheit. Diese Richtlinien umfassen neben visuellen Baumkontrollen auch die Dokumentation von sichtbaren Schäden und Schadsymptomen, die auf potenzielle Beeinträchtigungen der Stand- oder Bruchsicherheit hinweisen. Bei der Bewertung steht der vitale, arttypisch entwickelte Baum im Fokus. Wichtige Kriterien zur Beurteilung der Baumgesundheit sind:

- Verzweigungsgrad
- Triebzuwachs
- Laubdichte
- Blattgröße und -farbe
- Dickenzuwachs
- Wundüberwallung

Die FLL Baumkontrollrichtlinien (FLL, 2020) sind unter dem nachfolgenden Link zu finden:

https://shop.fll.de/de/baumkontrollrichtlinien-richtlinien-fuer-baumkontrollen-zur-ueberpruefung-der-verkehrssicherheit.html

Die **GALK-Empfehlungen zur Beurteilung von Stadtbäumen** stellen eine wertvolle Grundlage dar. Eine weiterführende Untersuchung der Bäume wird in aller Regel nur dann durchgeführt, wenn sichtbare Anzeichen für eine Beeinträchtigung der Stabilität oder Verkehrssicherheit vorliegen (FLL, 2013).

Die GALK-Empfehlungen (GALK, 2024) zur Beurteilung von Stadtbäumen sind unter dem nachfolgenden Link finden:

https://www.galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/empfehlungen-zur-beurteilung-von-baeumen-in-der-stadt

8 Bewusstseinsbildung und Partnerschaften

Es wird empfohlen, gezielt Informationen für die Bewohner:innen und Besucher:innen der Stadt zumindest im Umfeld der Baumaßnahme bereitzustellen, um sie über die Bedeutung des BRS aufzuklären und darüber zu informieren, wie es zur Verbesserung des städtischen Umfelds beiträgt. Diese Sensibilisierung sollte sich auch auf den Schutz und die Pflege des BRS erstrecken, um eine langfristige und nachhaltige Nutzung sicherzustellen. Darüber hinaus ist es sinnvoll, Partnerschaften mit lokalen Regierungsbehörden, Gemeindeorganisationen, Umweltschutzgruppen oder Bildungseinrichtungen anzustreben. Solche Kooperationen können dazu beitragen, zusätzliche Ressourcen, Finanzierungen oder Fachwissen für (Pilot-) Projekte zu gewinnen und dessen Erfolg langfristig zu sichern. Als Best-Practice-Beispiel sei das Expertennetzwerk Baumrigolen der Zukunftsinitiative Klima.Werk (Klima-Werk, o.J.)

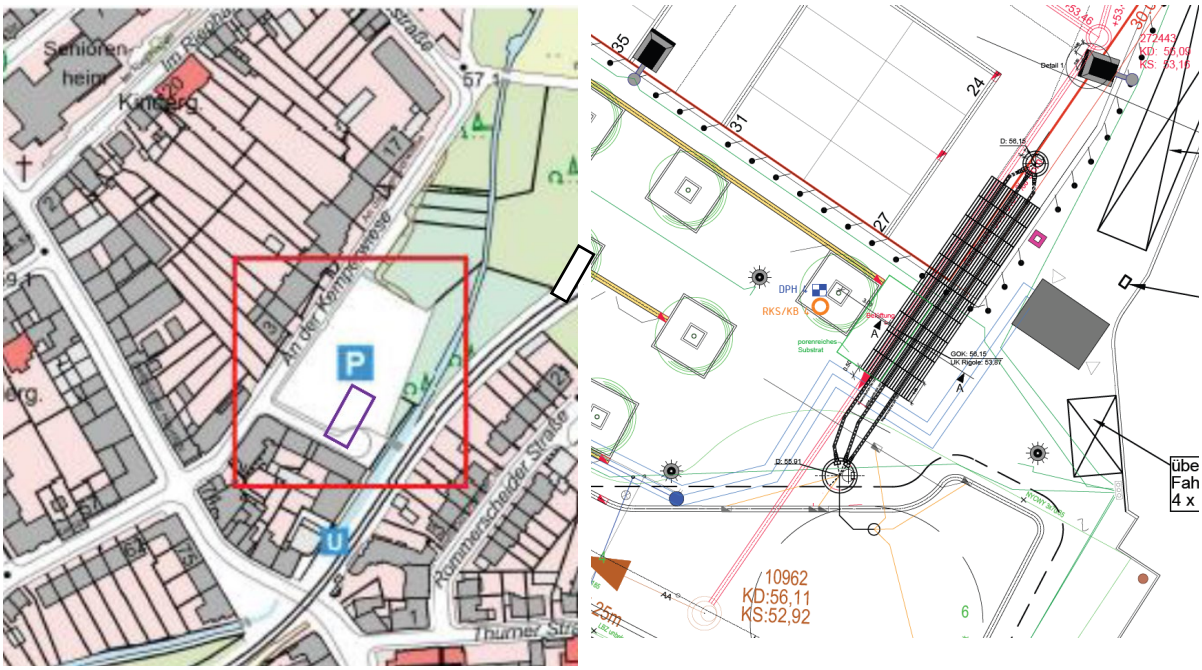
genannt, in dem seit 2022 ein kollegialer Austausch zu Baumrigolen zwischen Kommunen, Ingenieurbüros und Wissenschaftler:innen stattfindet.

9 Pilotprojekte

Pilotprojekte sind eine wertvolle Gelegenheit, theoretische Konzepte in die Praxis umzusetzen und die Funktionalität und Wirksamkeit neuer Systeme unter realen Bedingungen zu testen. Während der Projektlaufzeit konnten gemeinsam mit verschiedenen Kommunen Pilotprojekte begonnen werden. Die beiden Pilotprojekte mit dem am weitesten vorangeschrittenen Planungszustand (Stand Ende 2024) werden nachfolgend exemplarisch beschrieben. Die Pilotprojekte haben durch die Verbindung von Theorie und Praxis dem Projektkonsortium geholfen, den innovativen Ansatz das Boden-Rohr-Systems in städtischen Kontexten zu erproben und entscheidende Erkenntnisse sowohl für die Weiterentwicklung der Systemskizze, als auch für zukünftige Projekte zu gewinnen.

9.1 Pilotprojekt Köln

Das Pilotprojekt wird im Rahmen der Umbaumaßnahme des Marktplatzes an der Kemperwiese in Köln Dellbrück umgesetzt. Abbildung 16 a) zeigt einen Übersichtsplan des Marktplatzes. Der rote Kasten umrahmt den kompletten Umgestaltungsbereich, der kleinere lilafarbene Kasten umrahmten den Teil des Marktplatzes, der zum BRS umfunktioniert wird.



a) b)

Abbildung 16: a) Übersichtsplan des Marktplatzes an der Kemperwiese; b) Teilprojekt BoRSiS im Projekt An der Kemperwiese, Übersichtsplan (Stand: Entwurfsplanung 2024, StEB Köln, 2024)

Der dargestellte Platz wird als Parkplatz, Marktplatz und Festplatz genutzt. Im Rahmen der Neugestaltung, werden im südlichen Teil im Rahmen des Projekts „Das Wasser muss zum Baum“ Baumstandorte gebaut, die unterschiedliche Variationen von Baumrigolen aufzeigen sollen (StEB Köln, 2021). Durch die zeitgleiche Pflanzung von unterschiedlichen Systemen kann so zu einem späteren Zeitpunkt ein Erfolg der unterschiedlichen Bauweisen bewertet werden. Wie in Abbildung 16 b) zu sehen ist, wird der östlichste der geplanten Baumstandorte an das BRS angeschlossen. In diesem Fall wird das BRS fast genau wie in der Standardskizze umgesetzt (Abbildung 2). Unterschiede bestehen lediglich darin, dass in diesem Projekt kein Wannenelement verbaut, kein Wasser von Dachflächen eingeleitet und der Steinwollkörper breiter als der Leitungsgraben ausgebildet wird (Abbildung 17).

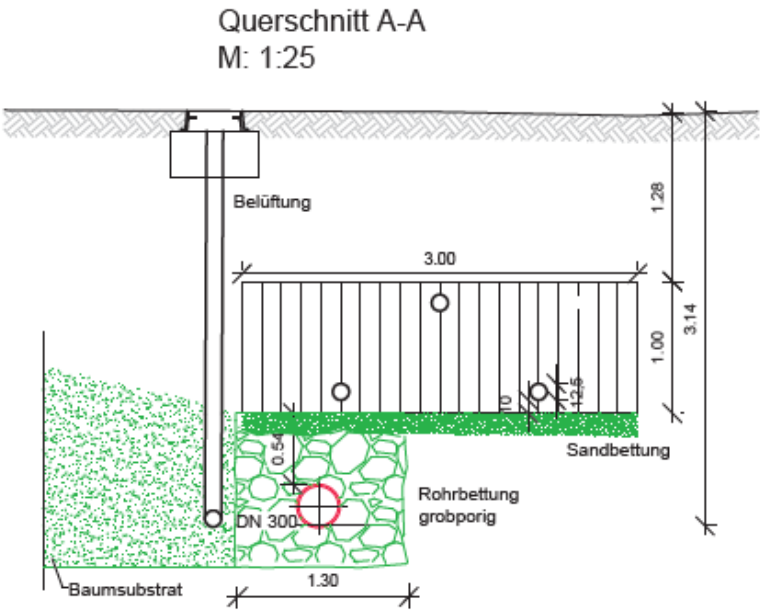


Abbildung 17: Teilprojekt BoRSiS im Projekt An der Kemperwiese, Querschnitt (Stand: Entwurfsplanung 2024, StEB Köln, 2024)

9.2 Pilotprojekt Leichlingen

In der Friedensstraße in der Stadt Leichlingen kann ein ca. 26 m langer Kanalabschnitt (Mischsystem) umgestaltet werden, da dieser bereits altersbedingt abgeschrieben und ein alternativer Anschluss der angrenzenden städtischen Wohnhäuser möglich ist (Abbildung 18). Die besondere Herausforderung dieses Pilotprojektes besteht im hohen Straßen- und Haltungsgefälle sowie in der Lage des Kanals im Gehweg und im Grünstreifen (statt in der Straße). Diese Rahmenbedingungen erfordern einige Modifikationen des im Kapitel 2 beschriebenen Standardsystems. Es erfolgt die Neupflanzung je eines Stadtbaums zwischen den beiden kaskadenförmig angeordneten Steinwollelementen und am unteren Ende der Haltung. Dies ermöglicht eine Anordnung der Speicherelemente auf verschiedenen Höhen. Die Befüllung der Elemente erfolgt in diesem Fall durch Rückstau aus den unterhalb an die Speicherelemente angrenzenden Schächten. Durch das im System zwischengespeicherte Niederschlagswasser soll so eine nachhaltige Wasserversorgung der beiden Bäume sichergestellt werden. Um sowohl eine Überlastung des Speicherkörpers als auch eine Staunässe

an den Baumstandorten zu vermeiden, ist eine Notentlastung (Überlauf) in die angrenzende Mischwasserhaltung am unteren Ende der Haltung angeordnet (Abbildung 19). Abbildung 19 ist zudem in einer größeren Ansicht im Anhang zu finden

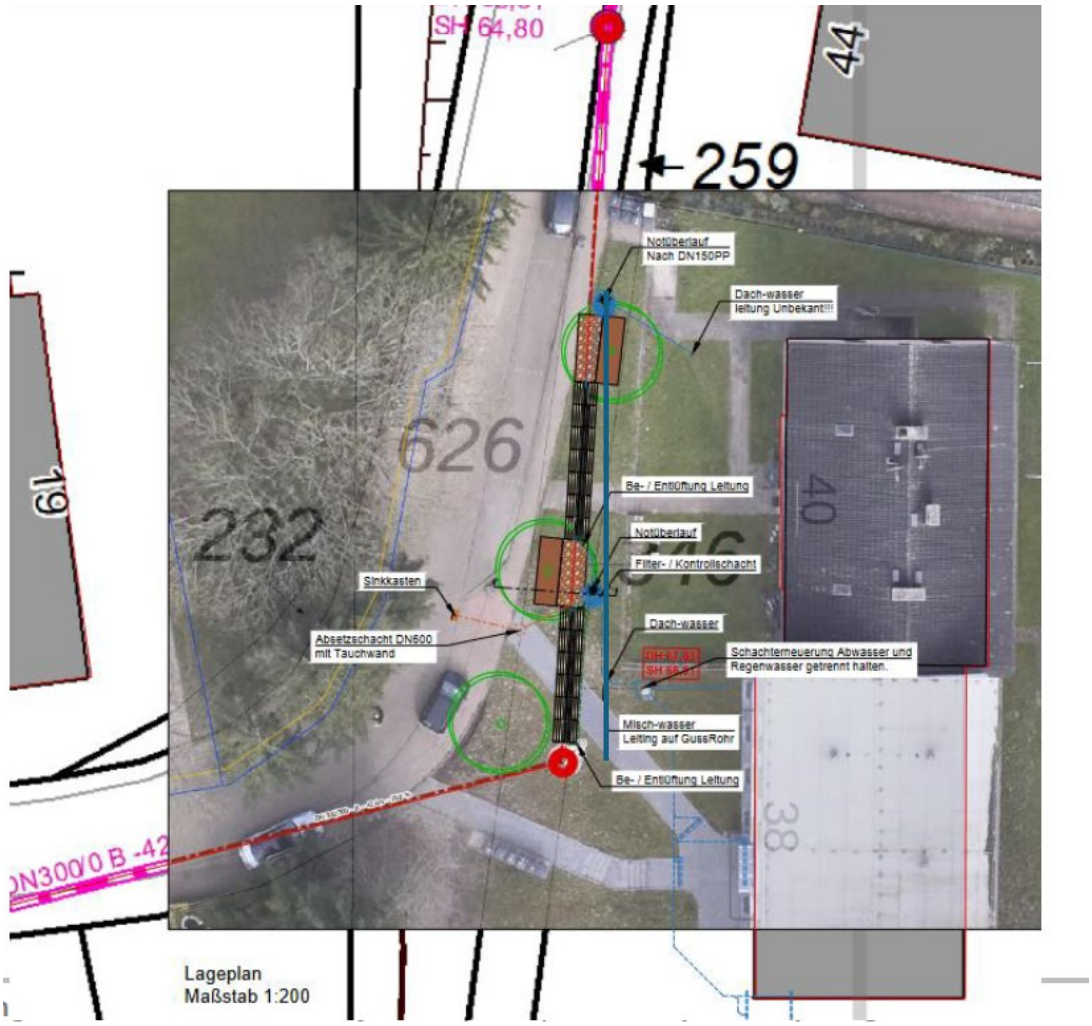


Abbildung 18: Draufsicht auf die Örtlichkeiten in Leichlingen, Datenbasis: Google Maps (Google, o.J.), eigene Überarbeitung

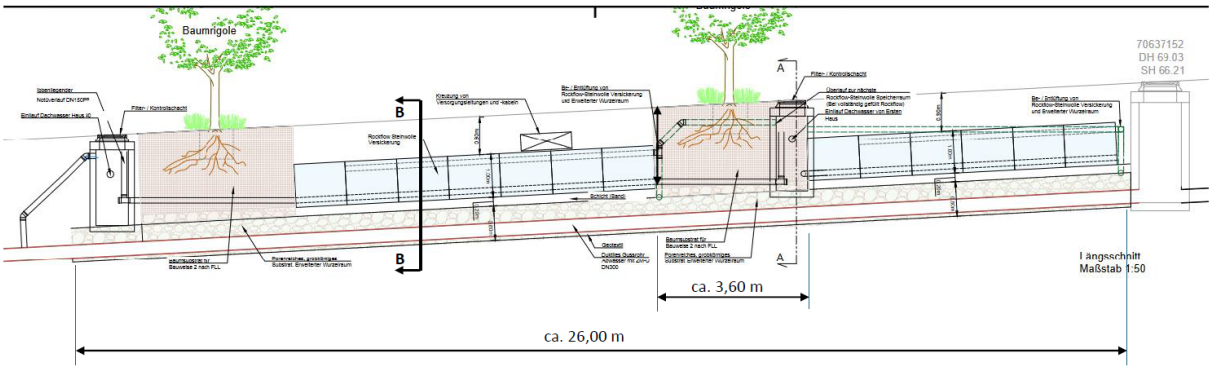


Abbildung 19: Längsschnitt der Systemskizze am Standort Friedensstraße in Leichlingen

10 Literaturverzeichnis

Bayrische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (2021): Forschungsbericht „Stadtgrün 2021“. Online verfügbar unter https://lwg.bayern.de/landespflege/urbanes_gruen/284928/index.php, zuletzt geprüft am 30.05.2025.

Becker, M.; Pfeiffer, E.; Becker, C. W.; Hasse, J. U. (2015): Wassersensible Stadtentwicklung (WSSE): Strategien, Maßnahmen und Umsetzungsbeispiele, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 8 (8), S.469-472.

Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz (GALK) e.V. (2021): GALK - Straßenbaumliste. Hrsg. Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz (GALK) e.V. Online verfügbar unter https://www.galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste, zuletzt geprüft am 30.05.2025.

Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz (GALK) e.V. (2024): Empfehlungen zur Beurteilung von Stadtbäumen. Online verfügbar unter: https://www.galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/empfehlungen-zur-beurteilung-von-baeumen-in-der-stadt/, zuletzt geprüft am 30.05.2025.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2022): Merkblatt DWA-M 102-4. Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 4: Wasserhaushaltsbilanz für die Bewirtschaftung des Niederschlagswassers

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2024a): Arbeitsblatt DWA-A 118. Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2024b): Arbeitsblatt DWA-A 138-1. Anlagen zur Versickerung von Niederschlagwasser Teil 1: Planung, Bau, Betrieb.

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (2009): DIN EN 598:2009-10. Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gusseisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 598:2007+A1:2009.

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (2015): DIN EN 1610:2015-12. Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen.

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (2016a): DIN 18916:2016-06. Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Pflanzen und Pflanzarbeiten.

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (2016b): DIN 1986-100: Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke - Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056. Ausgabe 2016-12.

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (2022): DIN EN 15542:2022-02 - Entwurf. Rohre, Formstücke und Zubehör aus duktilem Gusseisen - Zementmörtelumhüllung von Rohren - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche und Englische Fassung prEN 15542:2021.

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (2024): DIN EN 17970:2024-08. Rohre aus duktilem Gusseisen - Steckmuffen-Verbindungen für Rohrsysteme aus duktilem Gusseisen - Widerstandsfähigkeit gegen Wurzeleinwuchs - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 17970:2024.

European Environment Agency (EEA) (2012): Urban adaptation to climate change in Europe. Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies. Hrsg.: European Environment Agency. Copenhagen.

Floss, R. (2019): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. ZTV E-StB: Ausgabe 2017: Kommentar und Kompendium Erdbau, Felsbau, Landschaftsschutz für Verkehrswege. 5. Auflage. Bonn: Kirschbaum Verlag.

Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2010): Empfehlungen für Baumpflanzungen. Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate.

Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2015): Empfehlungen für Baumpflanzungen. Teil 1: Planung, Pflanzarbeiten, Pflege.

Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2020): Baumkontrollrichtlinien – Richtlinien für Baumkontrollen zur Überprüfung der Verkehrssicherheit, 2020 (Broschüre). Online verfügbar unter: https://shop.fll.de/de/baumkontrollrichtlinien-richtlinien-fuer-baumkontrollen-zur-ueberpruefung-der-verkehrssicherheit.html, zuletzt geprüft am 30.05.2025.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2012): RStO 12/24: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. Ausgabe 2012 / Fassung 2024 Online verfügbar unter https://www.fgsv-verlag.de/rsto-12-24, zuletzt geprüft am 07.05.2025.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA); Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) (2013): Merkblatt Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle. Ausg. 2013. Köln: FGSV-Verl. (FGSV R2 - Regelwerke, 939).

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2021a): REwS – Richtlinie für die Entwässerung von Straßen, Ausgabe 2021. Online verfügbar unter https://www.fgsv-verlag.de/rews. zuletzt geprüft am 30.05.2025.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2021b): REwS – Richtlinien für die Entwässerung von Straßen, Ausgabe 2021, Anhänge. Online verfügbar unter: https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/FGSV_539_Anhang_PDF_Word_Excel.zip, zuletzt geprüft am 30.05.2025.

Google (o. J.): Google Maps, zuletzt geprüft am 17.12.2024.

Klima.Werk (o.J.): Zukunftsinitiative Klima.Werk. Homepage. Online verfügbar unter: https://www.klima-werk.de/, zuletzt geprüft am 30.05.2025.

Kopinga, J. (1991): The effects of restricted volumes of soil on the growth and development of street trees; Journal of Arboriculture, March 1991, Vol. 17, No. 3, pp. 57-63

Kopinga, J. (1997): Grundlagen für die Bemessung und Anlage von Wurzelräumen für Stadtbäume; 15. Osnabrücker Baumpflegetage, 02./03.09.1997, Osnabrück, S. II-1 – II-19

NRW.BANK - Förderbank für Nordrhein-Westfalen (o. J.): Zukunftsfähige und nachhaltige Abwasserbeseitigung NRW (ZunA NRW). Online verfügbar unter https://www.nrwbank.de/de/foerderung/foerderprodukte/60185/zukunftsfaehige-und-nachhaltige-abwasserbeseitigung-nrw-zuna-nrw.html, zuletzt geprüft am 17.12.2024.

Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment (1967)* 7 (8), S. 769–779. DOI: 10.1016/0004-6981(73)90140-6.

openko.de (2023): KOSTRA-DWD-2020. öffentlich zugängliche Tabelle basierend auf den Daten des KOSTRA-DWD-2020 Atlas. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter https://www.openko.de/, zuletzt geprüft am 07.05.2025

Schlenkhoff A.; Kemper S.; Mayer A. (o.J.): Ableitung von extremen Niederschlagsereignissen im urbanen Raum: Leistungsfähigkeit von Straßeneinläufen, Kurzbericht zum Forschungsendbericht. Bergische Universität Wuppertal, gefördert vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. https://www.lanuk.nrw.de/fileadmin/tx_mmkresearchprojects/35_Kurzbericht_BUW_Strasseneinlaeufe.pdf

Stadtentwässerungsbetriebe (StEB) Köln (2021): Wasser muss zum Baum | Agglomerationsprogramm. Online verfügbar unter https://www.agglomerationsprogramm.de/projekte/zukunftsprojekte/pl-3/wasser-muss-zum-baum, zuletzt geprüft am 18.12.2024.

Stadtentwässerungsbetriebe (StEB) Köln (2024): Pilotprojekt der StEB Köln für BoRSiS: Marktplatz „An der Kemperwiese“ in Köln-Dellbrück. Vortrag von K. Elis beim BoRSiS-Verbundtreffen, Mülheim an der Ruhr, 27.09.2024.

Technische Universität Dresden (o. J.): Citree - Gehölze für urbane Räume. Planungsdatenbank. Online verfügbar unter https://citree.de/, zuletzt geprüft am 30.05.2025.

Transforming Cities (2020): Grün-blaue Infrastruktur – Lebensraum in Städten. In: *Transforming Cities Redaktion*, 2020. Online verfügbar unter https://www.transforming-cities.de/gruen-blaue-infrastruktur-lebensraum-in-staedten/, zuletzt geprüft am 07.05.2025.

Umweltbundesamt (UBA) (2024): UBA Texte 133/2024: Entwicklung eines Laborprüfverfahrens zum Rückhalt von partikulären Stoffen in dezentralen

Niederschlagsbehandlungsanlagen bei Einleitung in Oberflächengewässer Übersicht zu Behandlungstechniken in Deutschland, Anlage E. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-eines-laborpruefverfahrens-rueckhalt, zuletzt geprüft am 30.05.2025.

Universität Hohenheim (2022): Gartenpflege und gute gärtnerische Praxis: Hohenheimer Gärten. Online verfügbar unter https://gaerten.uni-hohenheim.de/gaertnerischepflege, zuletzt geprüft am 13.12.2024.

Virgil, F. (2022): Schwammstadt: ein Zukunftsmodell im Städtebau. Konzept bietet Städten Schutz vor Überschwemmungen nach Starkregen. Online verfügbar unter https://www.gruen-in-die-stadt.de/schwammstadt/, zuletzt geprüft am 07.05.2025

Zhang, T.; Su, X.; Wu, L. (2023): Integrating multiple comparison methods for attributing hydrological drought evolution and drought propagation: The impact of climate change cannot be ignored. *Journal of Hydrology* 621, Article 129557. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129557

Anhang

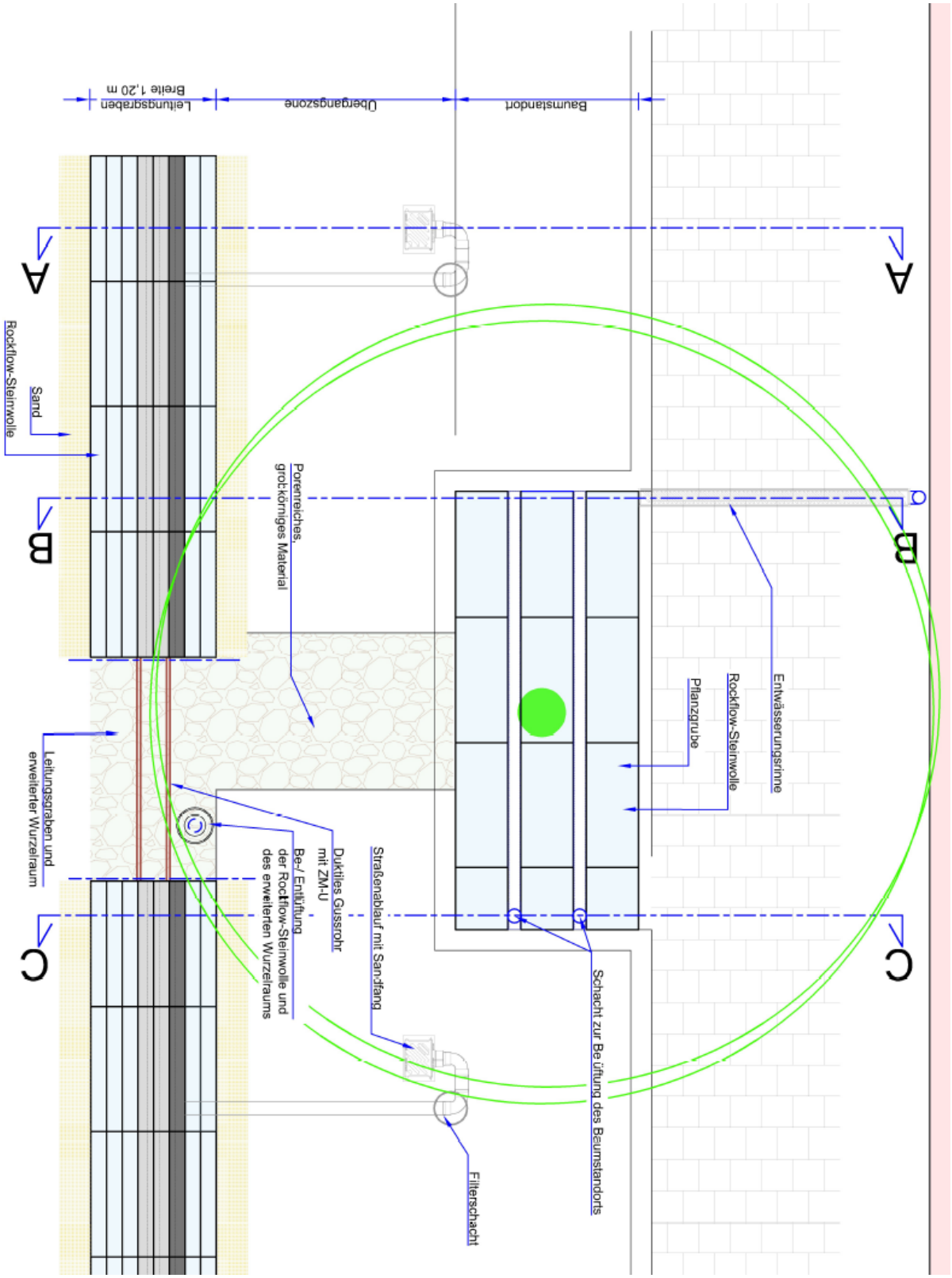


Abbildung A-1: Draufsicht auf das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (oberflächennahe Zufuhr des Niederschlagswassers)

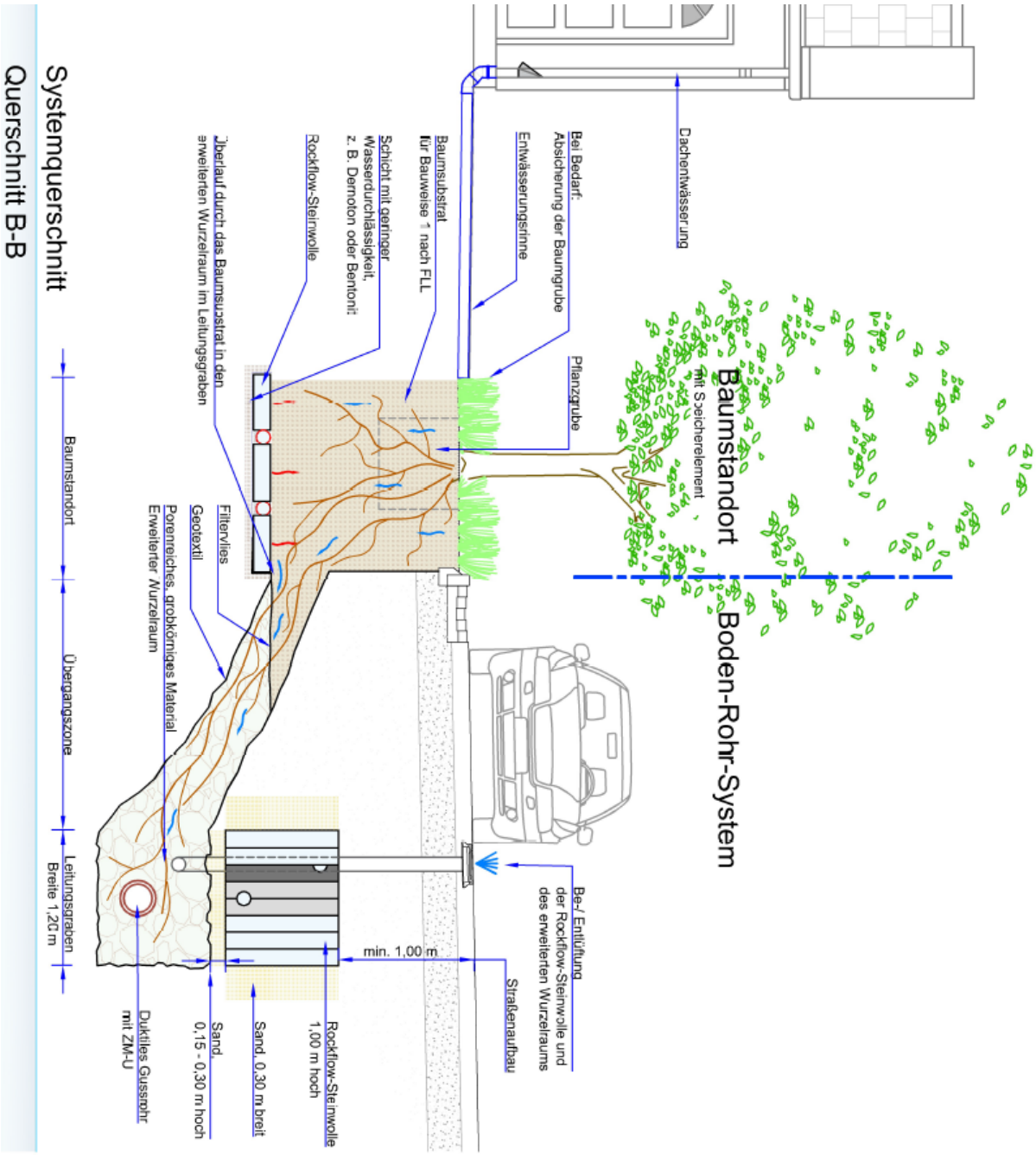


Abbildung A-2: Querschnitt B-B durch das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (oberflächennahe Zufuhr des Niederschlagswassers)

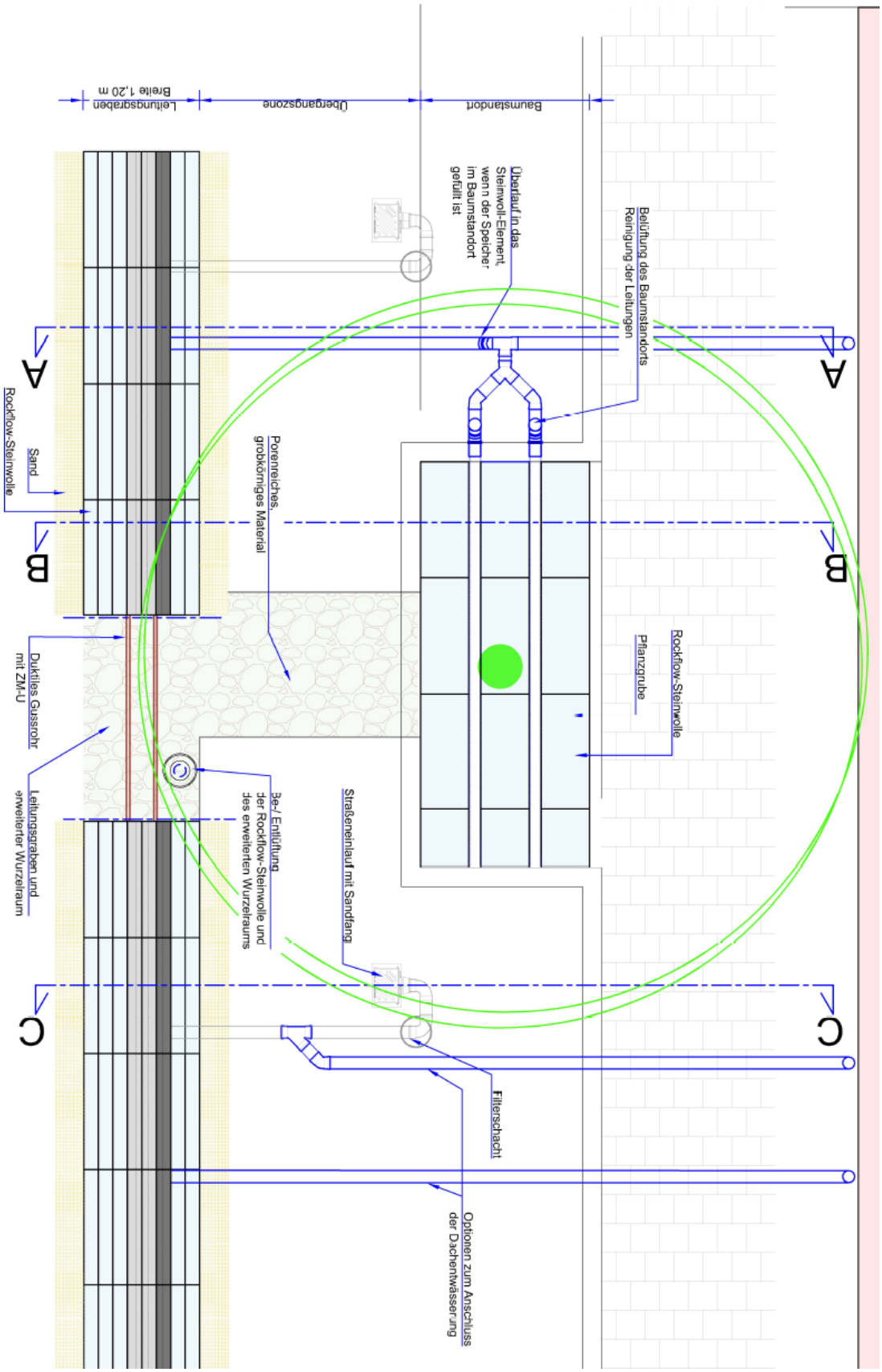


Abbildung A-3: Draufsicht auf das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (tiefliegende Zufuhr des Niederschlagswassers)

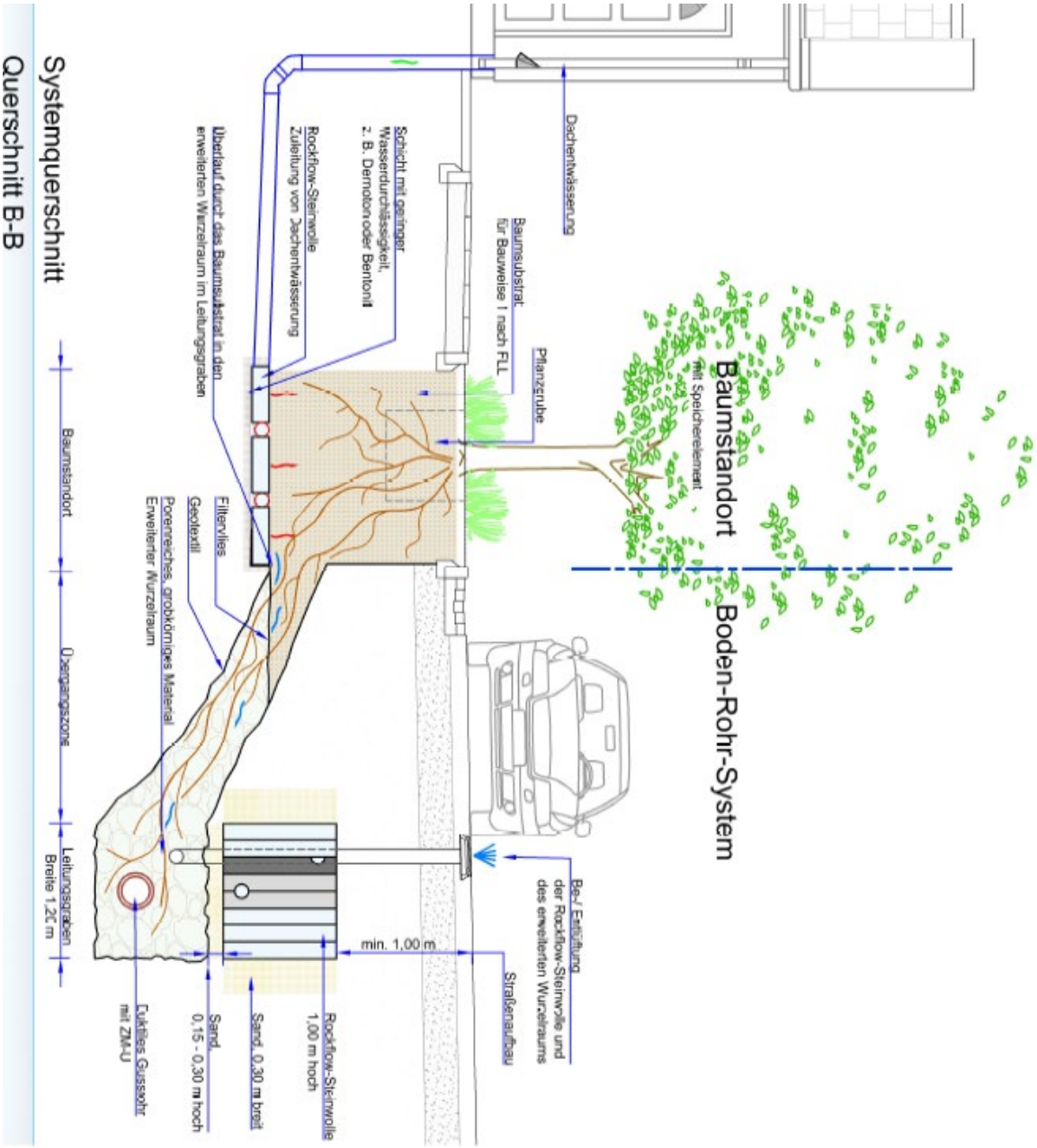


Abbildung A-4: Querschnitt B-B durch das Boden-Rohr-System mit angeschlossenem Baumstandort (oberflächennahe Zufuhr des Niederschlagswassers)

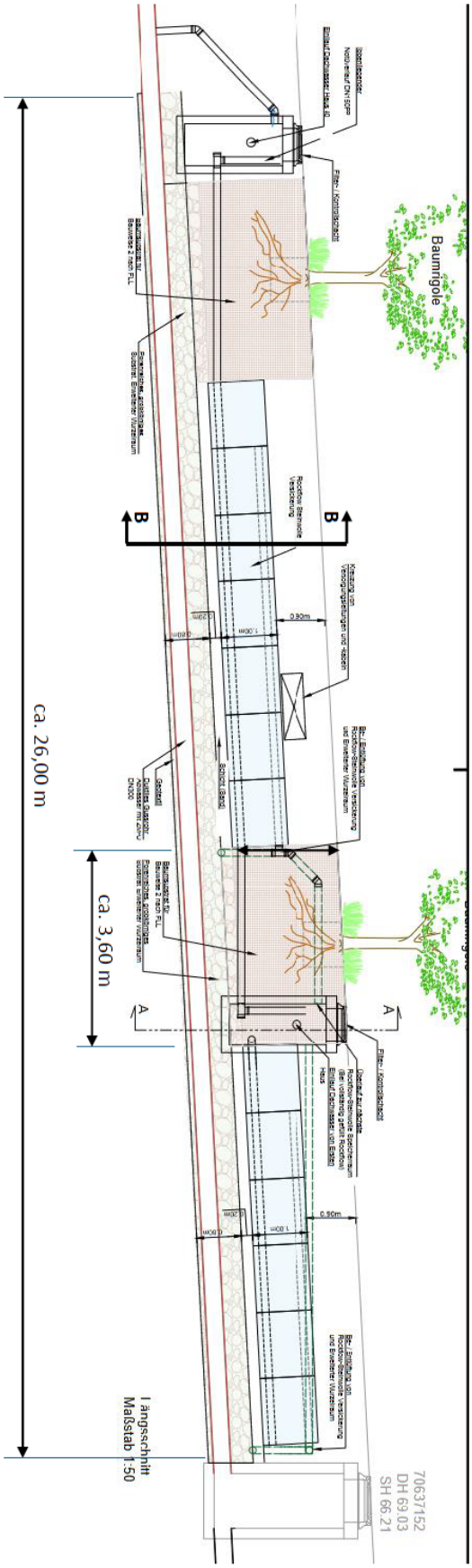
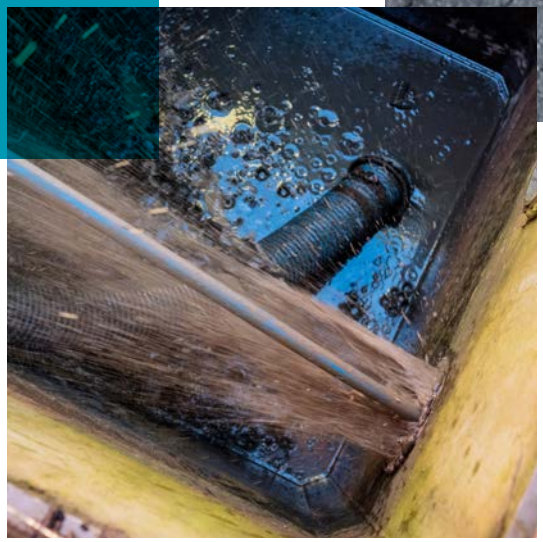


Abbildung A-5: Längsschnitt der Systemskizze am Standort Friedensstraße in Leichlingen

RAINWATER SYSTEMS

ROCKWOOL®

Inspektion und Reinigung Richtlinien



RAINWATER SYSTEMS

ROCKWOOL®

Inspektion und Reinigung von Rockflow-Systemen

Die vorliegenden Richtlinien erläutern die Grundprinzipien für die Inspektion und Reinigung eines Rockflow Versickerungssystems.

Ein Rockflow-System besteht aus mehreren vertikal gestapelten und mit Wassereinlass- und Entlüftungskanälen verbundenen Steinwollblöcken.

Es nimmt über den Wasserkanal unten Wasser auf, das dann in den Speicher aus Steinwolle fließt. Die Luft macht dabei dem Wasser Platz und verlässt das System durch die Entlüftungsöffnung oben (Abb. 1).

Rockflow wurde für eine lange Lebensdauer von über 50 Jahren konzipiert, in der das System den gesamten ankommenden Regen und Niederschlag aus seinem Einzugsgebiet auffängt, zurückhält und viele Male versickern lässt. Wie bei allen Versickerungssystemen bilden sich auch bei Rockflow Ablagerungen durch Partikel, die mit dem einströmenden Wasser eindringen. Diese gelangen nicht in die Steinwollmatrix, sondern sammeln sich mit der Zeit in den Wasserkanälen an, wodurch diese ggf. verstopfen und so Kapazität und Geschwindigkeit der Wasseraufnahme im System reduzieren.

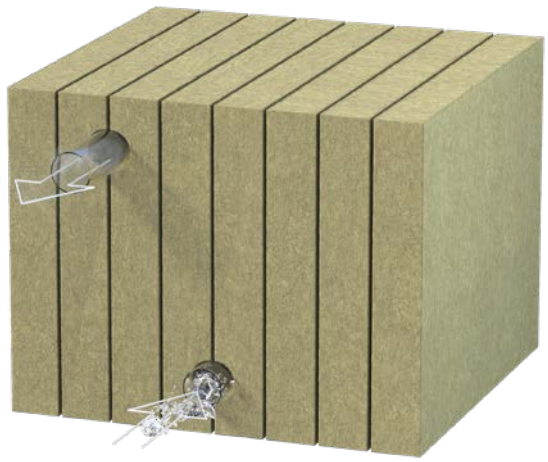


Abb. 1: Funktionsprinzip eines Rockflow-Systems: Wassereinlasskanäle unten, Luftauslass oben.

Die gute Nachricht ist jedoch: Die Wasserkanäle lassen sich problemlos inspizieren und reinigen, was Absorptionsgeschwindigkeit und Speicherkapazität wiederherstellt und so die Systemleistung über die gesamte Lebensdauer über erhält. Andere Versickerungslösungen auf dem Markt gewährleisten dies nicht zwingend.

Das System muss nicht ständig gesäubert werden. Wie oft eine Reinigung nötig ist, hängt von zwei Hauptfaktoren ab:

1. Auftreten von Starkregenereignissen oder anderen extremen Ereignissen, wie Überschwemmungen

Ihr Rockflow-System ist so ausgelegt, dass es Regenwasser bewältigen kann, wie es zumeist innerhalb mehrerer Jahre oder gar Jahrzehnte auftritt. Solche starken Regengüsse und Wassermassen transportieren jedoch auch viele Ablagerungen in das im betroffenen Gebiet installierte Versickerungssystem. Bei extremeren Regenfällen oder unerwarteten Ereignissen, wie Überschwemmungen, ist es wahrscheinlicher, dass binnen kurzer Zeit sehr viele Sedimente in das System gelangen, das dann gereinigt werden muss, um die Wasseraufnahme wiederherzustellen.

2. Die Sedimentart im Auffangbereich des Systems

Die Art der Sedimente, mit denen Ihr System konfrontiert wird, ist ortsabhängig. Ist Ihr System bspw. in einem Gebiet mit vielen Bäumen und Pflanzen installiert, enthält es wahrscheinlich mehr (von Blättern, Samen oder kleinen Ästen stammende) organische Sedimente als vergleichbare Systeme in Industriegebieten. Ebenfalls entscheidend ist die Art des Bodens: Schlick oder Lehmpartikel verstopfen die Kanäle tendenziell schneller als Sand.

Erst inspizieren, dann reinigen

Da sich obige Faktoren je nach System unterscheiden, lässt sich die genaue Inspektions- und Reinigungshäufigkeit nur schwer vorhersagen. Deshalb sollten Sie Ihr System zunächst inspizieren, um zu prüfen, ob es gereinigt werden muss.

Der richtige Zeitpunkt für Inspektion und Reinigung: Die Zweierregel

Als Faustregel sollten Sie Ihr System möglichst etwa zwei Jahre nach dem Einbau erstmalig inspizieren. Liegen auf den Böden der Wasserkanäle Ablagerungen von über 2 cm, sollten Sie die Kanäle reinigen.

Bei dünneren Schichten können Sie eine weitere Inspektion in 2 Jahren planen (oder früher, je nach der in den Kanälen festgestellten Sedimentbelastung).

War Ihr System extremem Regen oder einer anderen Art Überschwemmung ausgesetzt, sollten Sie es kurz darauf inspizieren, um festzustellen, ob es gereinigt werden muss (Abb. 2).

Hinweis: Dazu brauchen Sie aber nicht alle Kanäle zu prüfen, sondern (bei Mehrkanalsystemen) nur einige. Sie müssen auch nicht die gesamte Kanallänge inspizieren.

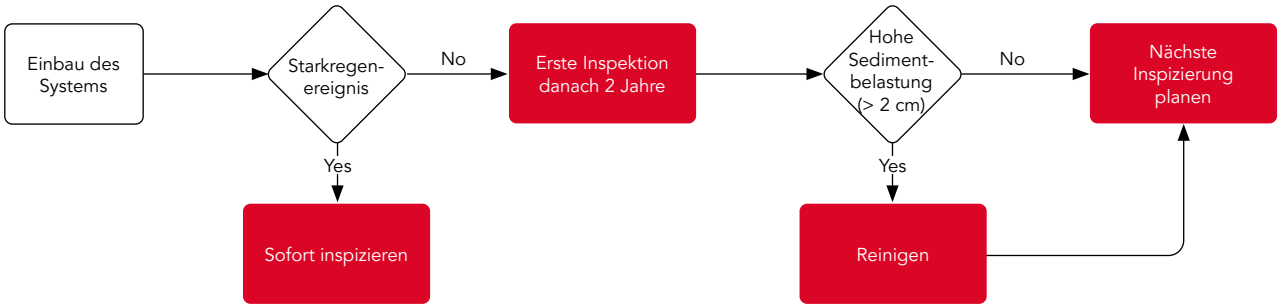


Abb. 2: Der richtige Zeitpunkt für die Inspektion oder Reinigung eines Rockflow-Systems

So inspizieren Sie ein Rockflow-System

Rockflow-Systeme (genauer: die in ihnen enthaltenen Wasserkanäle) lassen sich visuell mittels Roboter- oder Schiebekamera inspizieren. Das Werkzeug richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten:

- Die Roboterkamera (Abb. 3) ist vorzuziehen, da sie höher auflösende Bilder liefert, ist aber nur bei geradem Zugang zum Wasserkanal geeignet. Sie kann nicht um Kurven navigieren oder in sehr engen Schächten eingesetzt werden.
- Eine Schiebekamera ist flexibler, kann fast alle Kurven meistern, liefert aber qualitativ schlechtere Bilder.

Abb. 3: Roboterkamera

Tipp: Die meisten Kanalinstandhaltungsfirmen verleihen die für eine Inspektion erforderlichen Geräte.

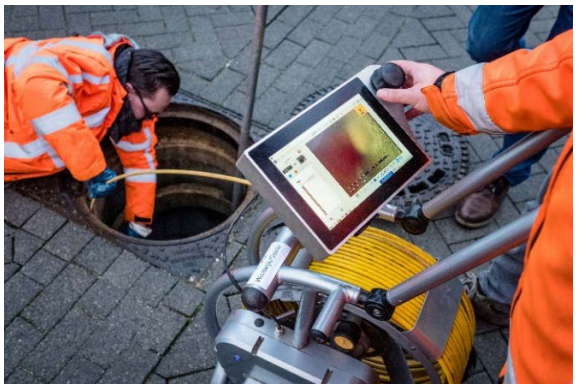


Abb. 4: Schiebekamera

So inspizieren Sie Ihr Rockflow-System:

1 Öffnen Sie den Schacht.

2 Führen Sie die Kamera vor den gewünschten Kanal.

3 Schieben Sie die Kamera in den Kanal.

4 Analysieren Sie die Kamerabilder nach der folgenden visuellen Checkliste.

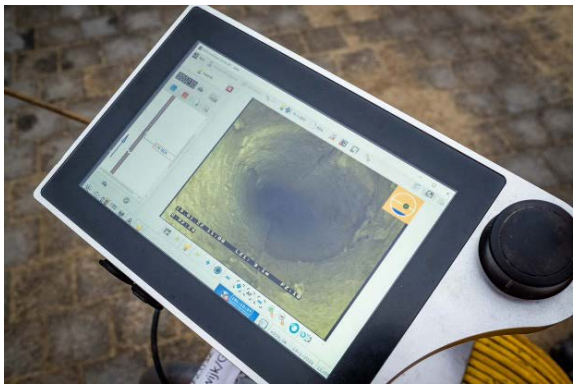


Abb. 5: Darstellung per Kamera

Visuelle Checkliste

Befindet sich auf dem Boden des Wasserkanals eine sichtbare Sedimentschicht?

A

Nein, der Kanal ist sauber

> Kein Handlungsbedarf

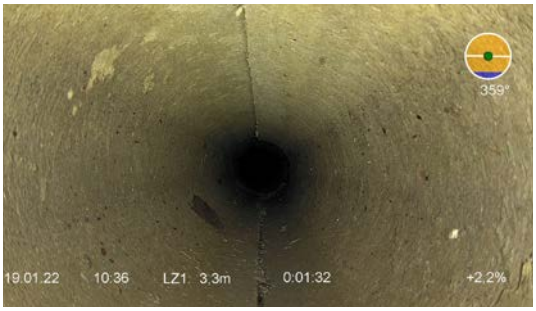


Abb. 6: Beispiel für einen sauberen Kanal (nach erfolgter Reinigung)

B

Ja, aber die Schicht ist dünn

> Kein sofortiger Handlungsbedarf, terminieren Sie jedoch eine neue Inspektion

Abb. 7: Beispiel für eine typische Sedimentschicht von unter 2 cm

C

Ja, die Sedimentschicht ist stärker als 2 cm

> Reinigen Sie den Kanal

Abb. 8: Beispiel für eine Sedimentschicht von über 2 cm

D

Der gesamte Kanalumfang enthält Sedimente, und die Steinwollstruktur ist nicht mehr sichtbar

> Reinigen Sie den Kanal

Abb. 9: Beispiel für Sedimente auf der gesamten Kanaloberfläche

Weist der sichtbare Wasserkanal Wurzelwachstum/-durchdringung auf?

Diese Erscheinung ist möglich, aber selten und beeinträchtigt u. U. den Wasserfluss im Kanal, nicht jedoch, wie schnell die Steinwolle das Wasser aufnimmt. Die Wurzeln können Sie abschneiden bzw. abfräsen.

> Kontaktieren Sie das Rockflow-Team

Abb. 10: Beispiel für in den Kanal hineinwachsende Haarwurzeln

Gibt es in den Kanälen Spuren von Tieren?

Steinwolle ist tierfreundlich, so dass Sie durchaus Spinnen und andere Insekten oder sogar Frösche vorfinden können, die aber für das System unschädlich sind.

> Kein Handlungsbedarf

Abb. 11: Beispiel für einen Frosch in einem Kanal

So reinigen Sie ein Rockflow-System

Sie können Rockflow-Kanäle mittels Wasserdruck (50-80 bar) säubern. Dazu benötigen Sie eine Düse (0-15° oder rückwärts sprühend). Mit einer vorwärts sprühenden Düse können Sie bequem große Sedimentstücke aufbrechen.

So reinigen Sie Ihr Rockflow-System:

1 Öffnen Sie den Schacht.

2 Setzen Sie die Düse vor das Rohr oder den Kanal, das bzw. den Sie reinigen wollen.

3 Stellen Sie den Wasserdruck ein (50–80 bar).

4 Stützen Sie den Schlauch ab und platzieren Sie die Düse in den Kanal. Prinzipiell müssten Sie den Schlauch 20–40 m in den Kanal einführen können. Längere Kanäle sollten Sie von zwei Seiten reinigen.

5 Bei einer sehr starken Sedimentbelastung können Sie die Schicht mit einer Vorwärtssprühdüse aufbrechen, bevor Sie mittels Rückwärtssprühdüse reinigen.

6 Hat die Düse die gewünschte bzw. maximale Kanaltiefe erreicht, ziehen Sie den Schlauch zu sich. Das Sediment gelangt dann zurück zum Schacht, wo es aufgesaugt werden kann (Abb. 13)

Abb. 12: 0–5° oder Rückwärtssprühdüse

Abb. 13: Sedimente werden aus dem Kanal in den Schacht geschoben

Prävention

Damit keine Sedimente in das Rockflow-System gelangen können, sollten Sie mit dem System verbundene Schächte und Sandfänge regelmäßig säubern. Dies ist besonders wichtig, wenn ein neues System in Betrieb geht, da es oft von unbebautem Land umgeben ist oder viel Mörtel verwendet wird. Hierdurch können schon frühzeitig viele Ablagerungen in die Rockflow-Kanäle gelangen. Folglich raten wir Ihnen, die Sandfänge in den Gullys zusätzlich zu reinigen.

ROCKWOOL Group is the world leader in stone wool products, from building insulation to acoustic ceilings, external cladding systems to horticultural solutions, engineered fibres for industrial use to insulation for the process industry and marine & offshore. We are committed to enriching the lives of everyone who experiences our products and services, and to helping customers and communities tackle many of today's biggest sustainability and development challenges including energy consumption, noise pollution, fire resilience, water scarcity, urban flooding and more.

RAINWATER SYSTEMS

ROCKWOOL®

Besuchsadresse
ROCKWOOL Rainwater Systems
Delfstoffenweg 2
6045 JH Roermond
Niederlande

Postanschrift
ROCKWOOL Rainwater Systems
P.O. Box 1160
6040 KD Roermond
Niederlande

Tel: +31 4 75 35 35 55
E-Mail: rain@rockwool.com
rain.rockwool.com

Rechenvorschrift für die Dimensionierung des Boden-Rohr-Systems

Die Rechenvorschrift wurde im Rahmen des BMBF-Verbundforschungsprojekts

BoRSiS – Boden-Rohr-System als innovatives Element der klimaangepassten Stadtentwässerung (Förderkennzeichen 13FH002KA0) im Zeitraum 01.10.2021 – 31.12.2024 von folgenden Projektbeteiligten erarbeitet

Prof. Dr. Markus Quirmbach (Verbundkoordinator), Henrike Walther, Saphira Schnaut (Hochschule Ruhr West, Lehrgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Hydrologie und Wasserbau)

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

FORSCHUNG AN FACHHOCHSCHULEN

Das vorliegende Dokument dient als Berechnungsgrundlage für die Dimensionierung eines BoRSiS-Standardelements. Die einzelnen Schritte, die zur korrekten Dimensionierung führen, werden dabei detailliert beschrieben, durch entsprechende Formeln untermauert und anhand eines Beispiels veranschaulicht.

Auf Anfrage kann ein Excelsheet zur Verfügung gestellt werden, das es ermöglicht, die Dimensionierung des Systems an individuelle Anforderungen anzupassen. Die Berechnungen im Excelsheet basieren auf den in diesem Dokument erläuterten Formeln.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis III
Abkürzungsverzeichnis IV
1 Systemskizzen des Boden-Rohr-Systems 1
2 Anrechnung von verfügbarem Speichervolumen 2
3 Bestimmung des verfügbaren Speichervolumens 4
3.1 Speichervolumen innerhalb des Steinwollkörpers 4
3.2 Speichervolumen innerhalb der Sandschicht 4
3.3 Speichervolumen innerhalb der Leitungszone 4
3.4 Verfügbares Gesamtvolumen innerhalb des Leitungsgrabens 5
3.5 Verfügbares Speichervolumen in Bezug auf eine(n) Haltung/ Straßenabschnitt 5
4 Angeschlossene Flächen 6
4.1 Gehwege und Straßen 6
4.2 Dach- und Privatflächen 6
4.3 Angeschlossene Gesamtfläche an eine Haltung 7
5 Dimensionierung einer Haltung 8
5.1 Zulässiges Niederschlagsvolumen (ohne Versickerungsleistung) 8
5.2 Zulässige angeschlossene Fläche (ohne Versickerungsleistung) 9
5.3 Zulässiges Niederschlagsvolumen (mit Versickerungsleistung) 10
5.4 Zulässige angeschlossene Fläche (mit Versickerungsleistung) 12
Literaturverzeichnis 13

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lageplan des BoRSiS-Standardelements 1

Abbildung 2: Systemquerschnitt durch ein BRS – Standardelement 2

Abbildung 3: Aufbau und Elemente eines Leitungsgrabens Bettungstyp 1 nach EN 1610 (2015) 3

Abbildung 4: Aufbau des Boden-Rohr-Systems im Leitungsgraben, eigene Darstellung nach C. Bennerscheidt 3

Abbildung 5: KOSTRA-DWD-2020 Tabelle des Rasterfeld 137102 der Stadt Leichlingen, bereitgestellt von der Plattform openko.de. Die für das Beispiel aus Kapitel 5.1 (ohne Versickerungsleistung) relevanten Werte sind rot markiert, die aus Kapitel 5.3 relevanten Werte (mit Versickerungsleistung) sind grün markiert 9

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
A	Fläche
a	Jahre
b	Breite
Bst	Baumstandort
D	Dauerstufe
d	Durchmesser
Da	Dach
G	Gehweg
ges	gesamt
H	Haltung (Straßenabschnitt)
h	Höhe
HoBst	Haltung ohne Baumstandort
k	Durchlässigkeitsbeiwert bzw. hydraulische Leitfähigkeit des Bodens bzgl. Wasser gemäß DWA-A 138-1
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert bzw. hydraulische Leitfähigkeit eines wassergesättigten Bodens gemäß DWA-A 138-1
k_i	Bemessungsrelevante Infiltrationsrate (in der Regel wasserungesättigte Verhältnisse) gemäß DWA-A 138-1
L	Länge
L_1	laufender Meter Leitungszone
l	Liter
Le	Leitungszone
$L_ü$	Länge des Übergangsbereichs
lfd.m	laufender Meter
m	Meter
min	Minuten
N	Niederschlag
n	Porenvolumen
Q_s	Versickerungsrate
R	Rigole
r	Radius
St	Steinwollkörper
Str	Straße
T	Wiederkehrzeit
t	Tiefe (eines Gebäudes)
Ü	Übergangszone zwischen Baumstandort und Leitungszone
V	Volumen
zul	zulässig

1 Systemskizzen des Boden-Rohr-Systems

Das Boden-Rohr-System (BRS) verbindet Baumstandorte mit bestehenden Leitungsgräben und Regenwasser-Speicherelementen und bietet somit eine nachhaltige Lösung zur Verbesserung der urbanen Baumversorgung. Durch die Nutzung der Leitungsgräben innerhalb von Straßen als Speicherraum für Niederschlagswasser und als erweiterten Wurzelraum für Stadtbäume wird zusätzlicher Platzbedarf an der Oberfläche vermieden. Für eine genaue Dimensionierung des Systems ist es wichtig, dessen Aufbau zu verstehen. Der Lageplan (Abbildung 1) verdeutlicht, wie ein Standardelement im Straßenraum eingebaut werden sollte.

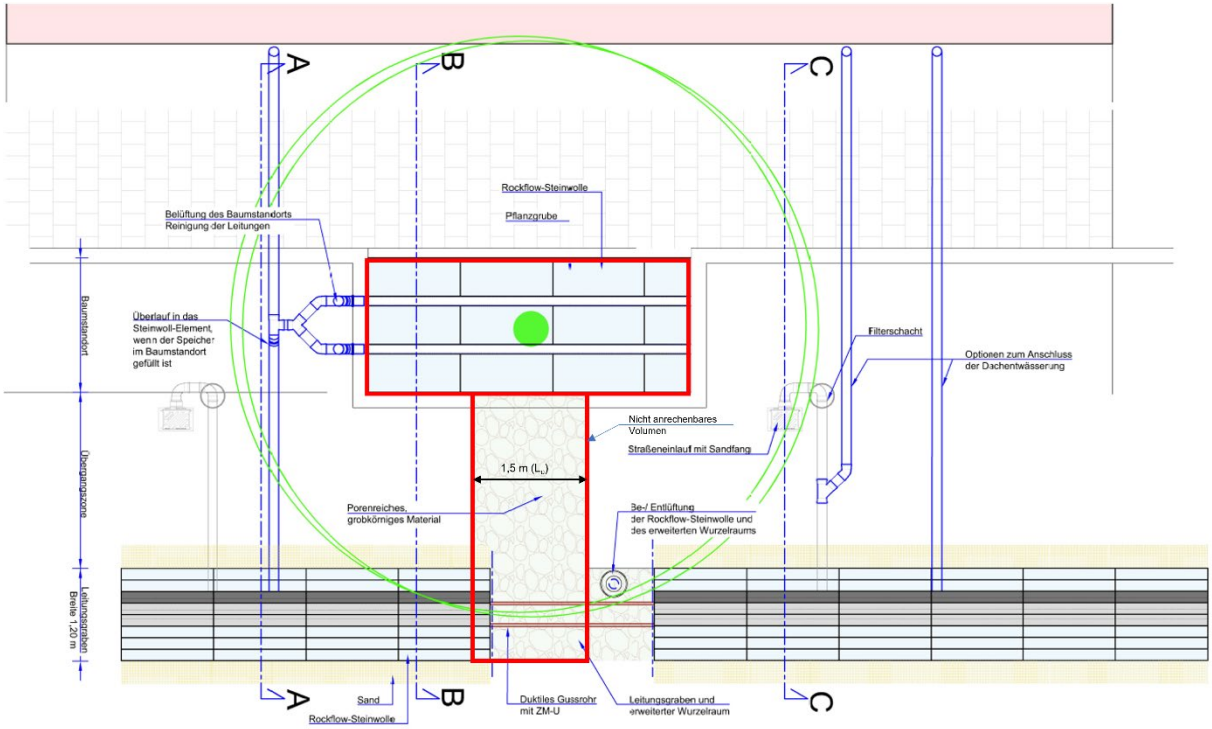


Abbildung 1: Lageplan des BoRSiS-Standardelements

Für ein tieferes Verständnis der Systemposition im Straßenraum zeigt Abbildung 2 den Systemquerschnitt B-B. Abbildung 1 und Abbildung 2 stellen schematische Darstellungen des Systems dar, die je nach Individualfall aber abweichen können. Weitere Details zum Systemaufbau sind der Handlungsempfehlung zu entnehmen. Dort wird zudem eine Variante dargestellt, die eine oberflächennahe Zufuhr des Niederschlagswassers von Dachflächen vorsieht. Da die Gestaltung des Baumstandortes sowie die Zufuhr des Niederschlagswassers keinen Einfluss auf die Dimensionierung haben, werden diese möglichen Unterschiede bei den folgenden Ausführungen nicht weiter berücksichtigt. Die Dimensionierung erfolgt auf Basis der bestehenden Regelwerke (FLL, 2010; DWA 2024a; DWA, 2024b) und wird für ein Starkregenereignis mit der Wiederkehrzeit von T = 20 a ausgelegt.

Nachfolgend wird der untere Bereich, in dem das Leitungsrohr liegt und der mit grobkörnigem Material verfüllt ist, gemäß DIN EN 1610 (2015) als Leitungszone bezeichnet. Diese Leitungszone soll den angeschlossenen Bäumen als erweiterter Wurzelraum dienen. Das gesamte

System, bestehend aus Steinwollelement, Sandschicht und darunter liegender Leitungszone entspricht einem Leitungsgraben. Das Gesamtkonstrukt (inkl. der Übergangsbereiche zu den Baumstandorten) wird nachfolgend als Boden-Rohr-System (BRS) bezeichnet.

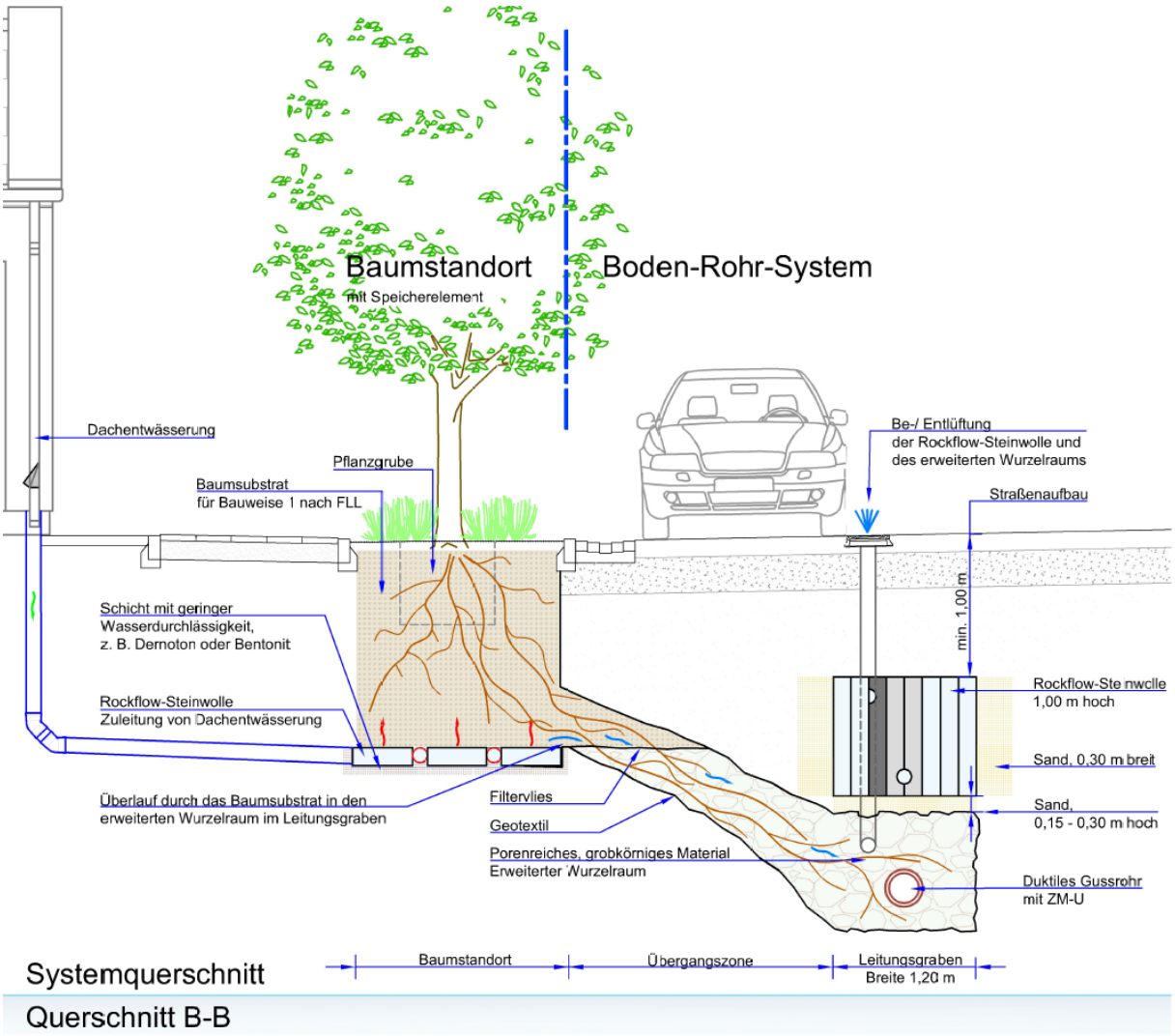


Abbildung 2: Systemquerschnitt durch ein BRS – Standardelement

2 Anrechnung von verfügbarem Speichervolumen

Eine häufig gestellte und bisher nicht hinreichend beantwortete Frage im Zusammenhang mit der Dimensionierung von Baumrigolen ist die Reduzierung des Speicher- (Poren-) Raums durch den Wurzeleinwuchs. Grundsätzlich sind der Speicher für das Niederschlagswasser und der Wurzelraum voneinander getrennt. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass auch in den Grobporen des Wurzelraums Wasser gespeichert werden kann.

In der Dimensionierungsvorschrift für das BRS wird deshalb folgender Ansatz gewählt: Es wird davon ausgegangen, dass im Laufe der Zeit Pflanzgrube, Übergangszone zum Leitungsgraben und ein Teil des Leitungsgrabens auf der Länge des Übergangsbereichs $L_Ü$ [m] vollständig durchwurzelt werden (rot markierte Bereiche in Abbildung 1). Aus Abbildung 2 kann entnommen werden, wie die Wurzeln sich innerhalb des Systems ausbreiten und durch die

Übergangszone in die Leitungszone einwurzeln. In der Praxis werden sich die Wurzeln jedoch über die festgelegte Länge $L_Ü$ [m] hinaus in der Leitungszone ausbreiten. Gleichzeitig wird der Porenraum des in Abbildung 1 rot markierten „nicht anrechenbaren Volumens“ nicht vollständig von Wurzeln durchdrungen. Diese Annahme gilt insbesondere für das Steinwollelement im oberen Bereich des Leitungsgrabens. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese beiden Effekte weitgehend ausgleichen und Unterschiede somit vernachlässigbar sind. In Abbildung 3 wird der Aufbau eines Leitungsgrabens mit Bettungstyp 1 nach EN 1610 (2015) dargestellt. In Anlehnung an diese Norm wurde der Leitungsgraben des BRS im Rahmen des BoRSiS-Projekts gestaltet (Abbildung 4).

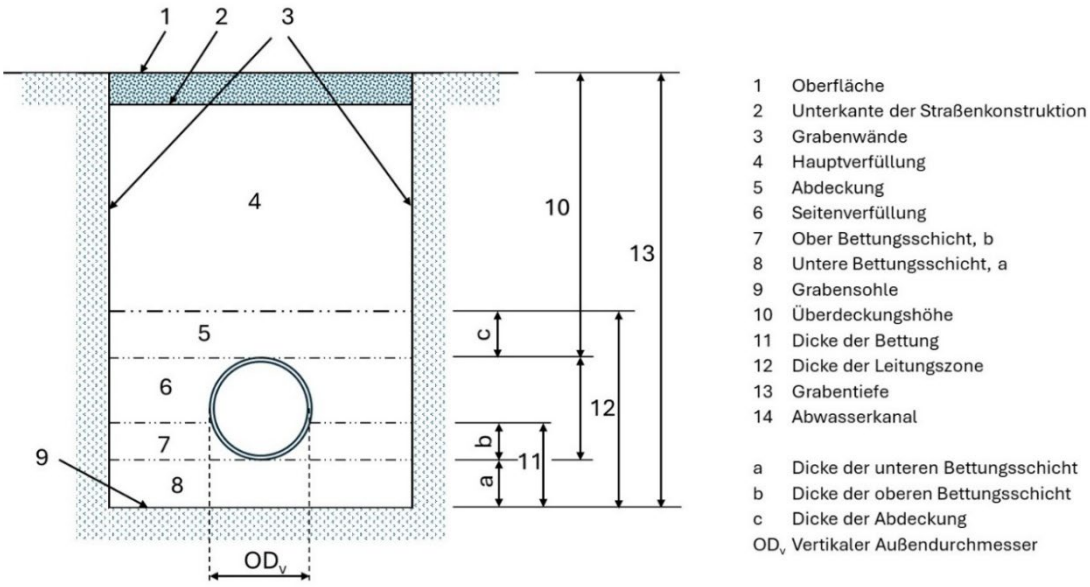
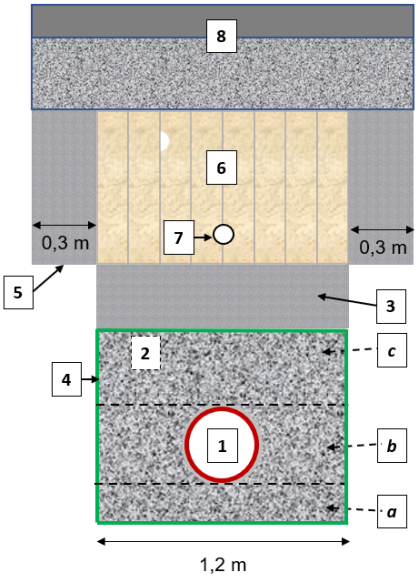


Abbildung 3: Aufbau und Elemente eines Leitungsgrabens Bettungstyp 1 nach EN 1610 (2015)

1. ***Duktiles Gussrohr nach EN 598 mit Zementmörtel-Umhüllung nach EN 15542***
2. ***(a) Rohrbettung***
   (b) Seitenverfüllung
   (c) Überdeckung, jeweils nach EN 1610 aus zugelassenem porenreichen, grobkörnigen Material (z. B. 32/64 mm)
3. ***Ausgleichschicht, Schichtdicke 0,15-0,3 m mit Sand***
4. ***Geotextil umschließt den Wurzelraum und dient als Übergang zu den Rockflow-Elementen***
5. ***Seitenverfüllung aus Sand, 0,3 m***
6. ***Rockflow-Elemente***
7. ***Sickerrohr***
8. ***Straßenaufbau***



Skizze nicht maßstäblich!

Abbildung 4: Aufbau des Boden-Rohr-Systems im Leitungsgraben, eigene Darstellung nach C. Bennerscheidt

3 Bestimmung des verfügbaren Speichervolumens

Für das verfügbare Speichervolumen wird ein laufender Meter (lfd.m) BRS bzw. Leitungsgraben (L_1), wie in Abbildung 4 dargestellt, außerhalb der Länge des Übergangsbereichs $L_Ü$ [m] berücksichtigt. In den nachfolgenden Berechnungen können bei den Ergebnissen Abweichungen aufgrund von Rundungen auftreten. Es werden bei den Ergebnissen jeweils die Werte angegeben, die sich aus der Berechnung mit dem korrespondierenden Excelsheet ergeben.

3.1 Speichervolumen innerhalb des Steinwollkörpers

Ermittlung des verfügbaren Speichervolumens innerhalb des Steinwollkörpers (mit einem Porenvolumen n_{St}) pro lfd.m:

$$V_{St} = n_{St} \times b_{St} \times h_{St} \times L_1 \; [m^3] \; pro \; lfd.m \qquad (1a)$$

Umrechnung von m³ in l pro lfd.m:

$$V_{St} = n_{St} \times b_{St} \times h_{St} \times L_1 \times 1.000 \; [l] \; pro \; lfd.m \qquad (1b)$$

<u>Beispiel</u>: mit n_{St} = 0,95, b_{St} = 1,2 m, h_{St} = 1 m und L_1 = 1 m (pro lfd.m):

$$V_{St} = 0{,}95 \times 1{,}2 \times 1 \times 1 \times 1.000 = 1.140 \; l \; pro \; lfd.m$$

Im Steinwollkörper können für das gewählte Beispiel pro lfd.m maximal 1140 l Wasser gespeichert werden.

3.2 Speichervolumen innerhalb der Sandschicht

Die Sandfüllungen in der Zwischenschicht sowie an den Rändern der Steinwollelemente dienen der mittelfristigen Speicherung des Niederschlagswassers, welches zeitverzögert in die Leitungszone bzw. zu den Wurzeln in der Leitungszone abgegeben wird. Daher wird dieses Volumen bei der Berechnung des Gesamtspeichervolumens nicht berücksichtigt. Diese Methode stellt eine sichere Herangehensweise dar, da in der Regel zumindest die seitliche Sandverfüllung Wasser aufnehmen kann. In kritischen Fällen sollte dieses Volumen gegebenenfalls als Speicherraum berücksichtigt werden.

3.3 Speichervolumen innerhalb der Leitungszone

Des Weiteren ist das verfügbare Volumen in der Leitungszone zu ermitteln. Es wird eine Leitungszone mit der Höhe h_{Le}, der Breite b_{Le} und einem Porenvolumen n_{Le} in Abhängigkeit vom Verfüllmaterial berücksichtigt. Von diesem Volumen ist der Querschnitt des Leitungsrohres mit dem Außendurchmesser d_a abzuziehen. Die Berechnung erfolgt pro lfd.m:

$$V_{Le} = n_{Le} \times (b_{Le} \times h_{Le} - \pi \times \frac{d_a^2}{4}) \times L_1 \; [m^3] \; pro \; lfd.m \qquad (2a)$$

Umrechnung von m³ in l pro lfd.m:

$$V_{Le} = n_{Le} \times (b_{Le} \times h_{Le} - \pi \times \frac{d_a^2}{4}) \times L_1 \times 1.000 \; [l] \; pro \; lfd.m \qquad (2b)$$

Beispiel: mit n_{Le} = 0,4 (16/32 Körnung), b_{Le} = 1,2 m, h_{Le} = 1 m, L_1 = 1 m und DN 300 (d = 0,34 m):

$$V_{Le} = 0{,}4 \times \left(1{,}2 \times 1 - \pi \times \frac{0{,}34^2}{4}\right) \times 1 \times 1.000 = 444\ l\ pro\ lfd.m$$

Im Verfüllmaterial der Leitungszone können für das gewählte Beispiel pro lfd.m maximal 444 l Wasser gespeichert werden.

3.4 Verfügbares Gesamtvolumen innerhalb des Leitungsgrabens

Das verfügbare Speichervolumen im Leitungsgraben (außerhalb der Länge des Übergangsbereichs $L_Ü$ [m]) pro lfd.m, basierend auf den vorangegangenen Gleichungen (a) [m³], ergibt sich wie folgt:

$$V_{ges} = V_{St} + V_{Le}\ [m^3]\ pro\ lfd.m \qquad (3a)$$

Gleichung auf Basis der vorangegangenen Gleichungen (b) [l] pro lfd.m:

$$V_{ges} = V_{St} + V_{Le}\ [l]\ pro\ lfd.m \qquad (3b)$$

Beispiel: basierend auf den Gleichungen (b) pro lfd.m:

$$V_{ges} = 1140 + 444 = 1.584\ l\ pro\ lfd.m$$

Im Leitungsgraben können für das gewählte Beispiel pro lfd.m insgesamt maximal 1.584 l Wasser gespeichert werden.

3.5 Verfügbares Speichervolumen in Bezug auf eine(n) Haltung/ Straßenabschnitt

Bei dieser exemplarischen Berechnung wird davon ausgegangen, dass die an das BRS angeschlossenen Bäume in einem Abstand von 20 m gepflanzt werden. Die Länge der eigentlichen Rohrleitung (Haltung) kann davon abweichen. Beim Berechnen des gesamten Speichervolumen ist zu beachten, dass nicht die gesamte Länge der Haltung verwendet wird. Wie zuvor beschrieben, wird die Länge des Übergangsbereichs $L_Ü$ [m] nicht in die Berechnung mit einbezogen, wobei $L_Ü$ mindestens 1,5 m betragen sollte. Daraus ergibt sich:

$$L_{HoBst} = L_H - (Anzahl\ der\ Baumstandorte \times L_Ü)\ [\mathrm{m}] \qquad (4)$$

Beispiel: mit einer Haltung der Länge L_H = 20 m und einem Baumstandort mit einer Übergangszone zwischen Baumstandort und Leitungsgraben mit der Länge $L_Ü$ = 1,5 m ergibt sich:

$$L_{HoBst} = 20 - (1 \times 1{,}5) = 18{,}5\ m$$

Das verfügbare Speichervolumen pro Haltung oder Straßenabschnitt mit der Länge L_{HoBst} (außerhalb des Übergangsbereichs) kann auf Basis der vorangegangenen Gleichungen (a) wie folgt ermittelt werden:

$$V_H = V_{ges} \times L_{HoBst}\ [m^3] \qquad (5a)$$

Beispiel: mit einer Länge für L_{HoBst} = 18,5 m kann das Volumen der Haltung auf Basis der Gleichungen (a) wie folgt berechnet werden:

$$V_H = 1{,}584 \times 18{,}5 \approx 29{,}3\ m^3$$

Auf Basis der vorangegangenen Gleichungen (b) kann das Volumen der Haltung/ eines Straßenabschnitts wie folgt beschrieben werden:

$$V_H = V_{ges} \times L_{HoBst}\ [\mathrm{l}] \qquad (5b)$$

Beispiel: mit einer Länge für L_{HoBst} = 18,5 m kann das Volumen der Haltung auf Basis der Gleichungen (b) wie folgt berechnet werden:

$$V_H = 1.584 \times 18{,}5 \approx 29.298\ l \approx 30\ m^3$$

In einer Haltung können (für das gewählte Beispiel) pro lfd.m maximal 30 m³ Wasser gespeichert werden, wenn das Speichervolumen auf Höhe des Übergangsbereichs vernachlässigt wird.

4 Angeschlossene Flächen

In diesem Kapitel werden alle potenziell anschließbaren Flächen berücksichtigt. Dies beinhaltet auch die Flächen auf Höhe der Baumscheibe bzw. des Übergangsbereichs. Die Flächen können pro laufenden Meter i) oder als Gesamtfläche ii) angegeben werden. Die Abflussbeiwerte werden bei Dachflächen und asphaltierten Straßen als Puffer gegen eine Unterdimensionierung nicht berücksichtigt. Sollten versickerungsfähige Einfahrten oder Wege angeschlossen werden, ist dagegen ein Abflussbeiwert anzusetzen.

4.1 Gehwege und Straßen

i) Im Folgenden wird die anzuschließende Fläche einer Straße inklusive deren Gehwege pro lfd.m berücksichtigt:

$$A_{Str} = (b_{Str} + b_G) \times L_1\ [m^2]\ pro\ lfd.m \qquad (6)$$

Beispiel: eine verkehrsberuhigte Straße (Wohnstraße) mit der Breite b_{Str} = 5 m und einer Gehwegbreite b_G = 1,5 m für einen lfd.m:

$$A_{Str} = (5 + 1{,}5\ ) \times 1 = 6{,}5\ m^2\ pro\ lfd.m$$

Für das gewählte Beispiel ergibt sich eine anschließbare Gehweg- und Straßenfläche von 6,5 m² pro lfd.m.

ii) Alternativ können auch bekannte Straßenflächen pro Haltung [m²] berechnet und berücksichtigt werden.

4.2 Dach- und Privatflächen

Im Folgenden werden Dachflächen und Privatflächen als anschließbare Flächen berücksichtigt (A_{Da}). Dabei werden befestigte Flächen senkrecht zum Straßenquerschnitt berücksichtigt,

die in Richtung der Straße bzw. des BRS entwässern (Formel 7). Soll eine beidseitige Bebauung angeschlossen werden, sind entsprechend beide Dachflächen bei der Angabe der Tiefe eines Gebäudes (t_{Da}) zu berücksichtigen. Die Flächen können entweder pro lfd.m i) oder als Gesamtfläche ii) angegeben werden.

i) Die Fläche eines angeschlossenen Daches oder einer Privatfläche pro lfd.m kann wie folgt ermittelt werden:

$$A_{Da} = t_{Da} \times L_1 \; [m^2] \; pro \; lfd.m \qquad (7)$$

Beispiel: bei einer Straße mit doppelseitiger Bebauung mit Reihenhäusern und Dachflächen mit einer Tiefe von jeweils 10 m ergibt eine anzusetzende Tiefe t_{Da} = 20 m:

$$A_{Da} = 20 \times 1 = 20 \; m^2 \; pro \; lfd.m$$

Für das gewählte Beispiel ergibt sich eine anschließbare Dach- und Privatfläche von 20 m² pro lfd.m.

ii) Alternativ können auch bekannte Dachflächen/ Privatflächen pro Haltung [m²] berechnet und berücksichtigt werden.

4.3 Angeschlossene Gesamtfläche an eine Haltung

Die angeschlossene Gesamtfläche A_{ges} kann sowohl pro laufenden Meter i) als auch als Gesamtfläche ii) berücksichtigt werden.

i) Angeschlossene Gesamtfläche pro lfd.m:

$$A_{ges} = A_{Str} + A_{Da} \; [m^2] \; pro \; lfd.m \qquad (8)$$

Beispiel: auf Basis der vorherigen Angaben ergibt sich:

$$A_{ges} = 6{,}5 + 20 = 26{,}5 \; m^2 \; pro \; lfd.m$$

Für das gewählte Beispiel ergibt sich eine anschließbare Gesamtfläche von 26,5 m² pro lfd.m.

ii) Alternativ können auch bekannte Dachflächen/ Privatflächen pro Haltung [m²] berücksichtigt werden.

Wird die angeschlossene Gesamtfläche auf eine Haltung mit einer Länge (inklusive Länge des Baumstandorts bzw. des Übergangsbereichs) L_H bezogen, ergibt sich:

$$A_H = A_{ges} \times L_H \; [m^2] \qquad (9)$$

Beispiel: bei einer Haltung mit einer Länge (inklusive Länge des Baumstandorts bzw. des Übergangsbereichs) L_H = 20 m und unter Berücksichtigung der zuvor angegebenen Werte für die angeschlossenen Flächen ergibt sich:

$$A_H = 26{,}5 \times 20 = 530 \; m^2$$

Für das gewählte Beispiel ergibt sich eine anzuschließende Gesamtfläche von 530 m².

5 Dimensionierung einer Haltung

In den nachfolgenden Berechnungen werden zwei unterschiedliche Berechnungsgänge/ Ansätze vorgestellt. In den Kapiteln 5.1 und 5.3 werden die im Kapitel 4 anzuschließenden Flächen berücksichtigt und es werden die Niederschlagsmengen ermittelt, die mit dem verfügbaren Volumen aus Kapitel 3 aufgenommen werden können. Im Kapitel 5.1 erfolgt die Berechnung zunächst ohne Berücksichtigung einer Versickerungsleistung durch den anstehenden Boden, im Kapitel 5.3 wird die Versickerungsleistung exemplarisch für einen Boden mit einem k_f-Wert $k_f = 10^{-5}$ m/s berücksichtigt.

In den Kapiteln 5.2 und 5.4 werden die Flächengrößen berechnet, die bei einem verfügbaren Volumen aus Kapitel 3 angeschlossen werden können, wenn eine vorgegebene Wiederkehrzeit des Bemessungsniederschlages vorgegeben wird. Exemplarisch erfolgt eine Berechnung für Niederschlagshöhen, die denen bei einem Überflutungsnachweis in einem Wohngebiet (T = 20 a nach DWA-A 118) entsprechen. Auch hier werden die beiden Varianten ohne (Kapitel 5.2) und mit (Kapitel 5.4) Versickerungsleistung des anstehenden Bodens vorgestellt.

Es wird an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass es bei diesen Niederschlagshöhen gerade nicht zu einem Überlaufen (Versagen) des Systems kommt und somit der Überstaunachweis nach DWA-A 118 erbracht wird. Ob das bei größeren Niederschlagshöhen austretende Wasser zu einem Schaden oder zu einer Funktionsbeeinträchtigung auf der Oberfläche führt, ist anhand einer Überflutungsüberprüfung vor Ort zu prüfen und ist nicht Gegenstand dieser Dimensionierungsvorschrift.

Alle Berechnungsbeispiele beziehen sich auf einen Haltungsabschnitt mit der Länge L_H = 20 m und einem Baumstandort. Zudem wird nur noch die Betrachtung nach Fall b) [l] berücksichtigt. Werden die Volumina in der Einheit [m³] verwendet, ist ein Faktor 1.000 zu berücksichtigen.

5.1 Zulässiges Niederschlagsvolumen (ohne Versickerungsleistung)

Die folgende Berechnung des zulässigen Niederschlagsvolumens, das in das System eingeleitet werden kann, berücksichtigt zunächst keine Versickerungsleistung und wird zur groben Abschätzung der Machbarkeit empfohlen.

$$N_{zul} = \frac{V_H\,[l]}{A_H\,[m^2]}\ [mm] \qquad (10)$$

<u>Beispiel</u>: für eine Haltungslänge L_H = 20 m, ein verfügbares Volumen von V_H = 29.298 l (aus Kapitel 3.5) und eine anzuschließende Fläche von A_H = 530 m² (aus Kapitel 4.3) ergibt sich eine zulässige Niederschlagshöhe N_{zul} zu:

$$N_{zul} = \frac{29.298}{530} = 55{,}28\ mm$$

Die ermittelte Niederschlagshöhe (hier N_{zul} = 55,28 mm) kann anschließend mithilfe des KOSTRA-DWD-2020 (openko.de, 2023) statistisch bewertet werden. In diesem Fall wurde als

Beispiel ein Raster (Rasterfeld 137102) der Stadt Leichlingen ausgewählt (Abbildung 5). Die für dieses Rechenbeispiel relevanten Werte sind rot umrandet.

openko.de

Starkniederschlagshöhen und -spenden gemäß KOSTRA-DWD-2020

Rasterfeld 137102

(Zeile 137, Spalte 102)

Regenspende und Bemessungsniederschlagswerte in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit T und Dauerstufe D

Ermittelte, Niederschlags menge, die das SPS aufnehmen kann:

Ohne Versickerung 55,3 mm

Mit Versickerung 72,4 mm

Versickerung wird berücksichtigt

Duration Step D		Return Period T																			
		1 a		2 a		3 a		5 a		10 a		20 a		30 a		50 a		100 a	
min	Std	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)	mm	l / (s ha)
5		6,7	223,3	8,0	266,7	8,9	296,7	10,0	333,3	11,6	386,7	13,2	440,0	14,3	476,7	15,7	523,3	17,7	590,0
10		8,5	141,7	10,3	171,7	11,3	188,3	12,7	211,7	14,8	246,7	16,8	280,0	18,2	303,3	20,0	333,3	22,6	376,7
15		9,7	107,8	11,7	130,0	12,9	143,3	14,5	161,1	16,8	186,7	19,2	213,3	20,7	230,0	22,8	253,3	25,7	285,6
20		10,6	88,3	12,8	106,7	14,1	117,5	15,9	132,5	18,4	153,3	21,0	175,0	22,7	189,2	24,9	207,5	28,1	234,2
30		12,0	66,7	14,4	80,0	15,9	88,3	17,9	99,4	20,7	115,0	23,7	131,7	25,6	142,2	28,1	156,1	31,7	176,1
45		13,5	50,0	16,2	60,0	17,9	66,3	20,1	74,4	23,3	86,3	26,6	98,5	28,8	106,7	31,6	117,0	35,7	132,2
60	1	14,7	40,8	17,6	48,9	19,5	54,2	21,9	60,8	25,4	70,6	28,9	80,3	31,3	86,9	34,4	95,6	38,8	107,8
90	1,5	16,5	30,6	19,8	36,7	21,8	40,4	24,6	45,6	28,5	52,8	32,5	60,2	35,1	65,0	38,6	71,5	43,5	80,6
120	2	17,8	24,7	21,5	29,9	23,7	32,9	26,6	36,9	30,8	42,8	35,2	48,9	38,1	52,9	41,8	58,1	47,2	65,6
180	3	20,0	18,5	24,0	22,2	26,5	24,5	29,8	27,6	34,6	32,0	39,4	36,5	42,6	39,4	46,8	43,3	52,8	48,9
240	4	21,7	15,1	26,0	18,1	28,7	19,9	32,3	22,4	37,4	26,0	42,7	29,7	46,2	32,1	50,7	35,2	57,2	39,7
360	6	24,2	11,2	29,1	13,5	32,2	14,9	36,2	16,8	41,9	19,4	47,8	22,1	51,7	23,9	56,8	26,3	64,1	29,7
540	9	27,1	8,4	32,6	10,1	36,0	11,1	40,5	12,5	46,9	14,5	53,5	16,5	57,9	17,9	63,5	19,6	71,7	22,1
720	12	29,4	6,8	35,3	8,2	39,0	9,0	43,8	10,1	50,8	11,8	58,0	13,4	62,7	14,5	68,8	15,9	77,6	18,0
1080	18	32,9	5,1	39,5	6,1	43,6	6,7	49,0	7,6	56,8	8,8	64,8	10,0	70,1	10,8	77,0	11,9	86,8	13,4
1440	24	35,6	4,1	42,8	5,0	47,2	5,5	53,1	6,1	61,5	7,1	70,2	8,1	75,9	8,8	83,3	9,6	94,0	10,9
2880	48	43,1	2,5	51,8	3,0	57,2	3,3	64,3	3,7	74,5	4,3	85,0	4,9	91,9	5,3	100,9	5,8	113,9	6,6
4320	72	48,2	1,9	57,9	2,2	64,0	2,5	71,9	2,8	83,3	3,2	95,1	3,7	102,8	4,0	112,9	4,4	127,3	4,9
5760	96	52,2	1,5	62,7	1,8	69,2	2,0	77,8	2,3	90,2	2,6	102,9	3,0	111,3	3,2	122,2	3,5	137,9	4,0
7200	120	55,5	1,3	66,7	1,5	73,6	1,7	82,8	1,9	95,9	2,2	109,4	2,5	118,3	2,7	129,9	3,0	146,6	3,4
8640	144	58,3	1,1	70,1	1,4	77,4	1,5	87,0	1,7	100,8	1,9	115,1	2,2	124,4	2,4	136,7	2,6	154,2	3,0
10080	168	60,9	1,0	73,2	1,2	80,8	1,3	90,8	1,5	105,2	1,7	120,1	2,0	129,8	2,1	142,6	2,4	160,9	2,7

Überflutungs-nachweis

Angaben in mm: Bemessungsniederschlagswerte h(n)
Angaben in l / (s ha): Regenspende R(n)

Datenbasis: KOSTRA-DWD-2020 des Deutschen Wetterdienstes, Stand 12/2022.
Für die Richtigkeit und Aktualität der Angaben wird keine Gewähr übernommen. Erstellt 01/2023.

Abbildung 5: KOSTRA-DWD-2020 Tabelle des Rasterfeld 137102 der Stadt Leichlingen, bereitgestellt von der Plattform openko.de. Die für das Beispiel aus Kapitel 5.1 (ohne Versickerungsleistung) relevanten Werte sind rot markiert, die aus Kapitel 5.3 relevanten Werte (mit Versickerungsleistung) sind grün markiert

a) Bis zu einer Dauerstufe D ≤ 180 min kann ein Niederschlagsereignis mit einer Wiederkehrzeit von T = 100 a zurückgehalten werden.

b) Bis zu einer Dauerstufe D ≤ 540 min kann das System Niederschlagshöhen mit einer Wiederkehrzeit T ≥ 20 a aufnehmen, sodass auf eine Überflutungsüberprüfung vor Ort nach dem DWA-A 118 (in Wohngebieten) verzichtet werden könnte.

c) Für längere Dauerstufen D ≥ 720 min ist eine Überflutungsüberprüfung vor Ort nach dem DWA-A 118 (in Wohngebieten) erforderlich und/ oder die Versickerungsleistung des anstehenden Bodens ist zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 5.3).

5.2 Zulässige angeschlossene Fläche (ohne Versickerungsleistung)

Nachfolgend wird die zulässige anzuschließende Flächengröße ermittelt, die sich für einen vorgegebenen Bemessungsniederschlag ergibt. Dabei ist die relevante Niederschlagshöhe N (T; D) aus einer Niederschlagsstatistik (z. B. nach KOSTRA-DWD-2020) für eine vorgegebene Wiederkehrzeit und Dauerstufe zu bestimmen. Ohne Berücksichtigung einer Versickerungsleistung würde sich zwangsläufig die kleinste zulässige anzuschließende Flächengröße bei einer maximalen Dauerstufe ergeben, da die Niederschlagshöhen mit zunehmender

Dauerstufe ansteigen und kein Wasser aus dem System entweichen kann. Das ist für eine erste Machbarkeitsstudie, für die dieser Ansatz ohne Berücksichtigung der Versickerungsleistung gedacht ist, aber nicht zielführend. Wiederkehrzeit T [a] und Dauerstufe D [min] sind daher in Abstimmung mit allen Beteiligten sinnvoll zu wählen.

$$A_{zul} = \frac{V_H\,[l]}{N(T;D)\,[mm]}\,[m^2] \qquad (11)$$

Beispiel A: mit T = 20 a und D = 60 min, entspricht nach KOSTRA-DWD-2020 für die Stadt Leichlingen N (20; 60) = 28,9 mm (Rasterfeld 137102), sowie ein verfügbares Volumen von V_H = 29.298 l (aus Kapitel 3.5):

$$A_{zul} = \frac{V_H}{N(20;60)} = \frac{29.298}{28{,}9} = 1.014\,m^2$$

Es kann im Beispiel A eine Fläche von ca. A = 1000 m^2 an eine Haltungslänge L = 20 m inklusive eines Baumstandortes angeschlossen werden.

Beispiel B: mit T = 20 a und D = 360 min, entspricht nach KOSTRA-DWD-2020 für die Stadt Leichlingen N (20; 360) = 47,8 mm (Rasterfeld 137102), sowie ein verfügbares Volumen von V_H = 29.298 l (aus Kapitel 3.5):

$$A_{zul} = \frac{V_H}{N(20;360)} = \frac{29.298}{47{,}8} = 613\,m^2$$

Es kann im Beispiel B eine Fläche von ca. A = 600 m^2 an eine Haltungslänge L = 20 m inklusive eines Baumstandortes angeschlossen werden.

5.3 Zulässiges Niederschlagsvolumen (mit Versickerungsleistung)

Analog zum Kapitel 5.1 erfolgt nun die Ermittlung des zulässigen Niederschlagsvolumen unter Berücksichtigung einer Versickerungsleistung des anstehenden Bodens. Bei den Berechnungen wird exemplarisch ein Boden mit einem k_f-Wert $k_f = 10^{-5}$ m/s berücksichtigt.

Die Sandschicht, beziehungsweise die Sandvolumina sowie das Steinwollelement geben das Niederschlagswasser nach unten in die Leitungszone ab. Hierbei handelt es sich zunächst um eine Umverteilung des Wassers im Leitungsgraben und noch nicht um eine Versickerung in den anstehenden Boden. Es wird davon ausgegangen, dass die darunter liegende Leitungszone wie eine Rohr-Rigole funktioniert, und dass ausschließlich über diesen die Versickerung in den Untergrund stattfindet. Die Versickerung über die Seitenwände der Steinwollelemente in den Boden wird nicht berücksichtigt, da hier nicht mit einem langfristigen Einstau gerechnet wird.

Da das verfügbare Speichervolumen im Wesentlichen durch die Dimensionen des Leitungsgrabens vorgegeben ist (lediglich die Höhe ist im begrenzenten Maße variabel) wird anders als bei der Dimensionierung einer Rohr-Rigole kein erforderliches Volumen und auch keine erforderliche Länge ermittelt.

Es wird daher für jede Dauerstufe die Versickerungsleistung berechnet, die zu den Niederschlagssummen bei den Berechnungen aus 5.1 zu addieren ist. Bei der Anwendung der Formel zur Berechnung einer Rohr-Rigole gemäß DWA-A 138-1 (2024b) ist der Faktor k_i zu berücksichtigen. Dieser Faktor setzt sich aus dem vorgegebenen k_f-Wert und einer Konstante k zusammen, die je nach Messverfahren des k_f-Werts abgeleitet wird. Zur Vereinfachung wird in diesem Fall angenommen, dass k = 1 ist. Dies ist in den jeweiligen Bemessungen bei Bedarf anzupassen. Darüber hinaus werden keine Abminderungs- und Zuschlagsfaktoren berücksichtigt.

Nach DWA-A 138-1 beträgt die Versickerungsrate Q_S einer Rohr-Rigole

$$Q_S = [(b_R + h_R) \times L_R + b_R \times h_R] \times k_i \times 1.000\ [\mathrm{l}/s] \qquad (12)$$

und das Versickerungsvolumen $V_{S,D}$ über eine Dauerstufe D

$$V_{S,D} = Q_S \times D \times 60\ [l] \qquad (13)$$

Da das Versickerungsvolumen erst bei größeren Dauerstufen relevant wird, bei denen der überschlägige Nachweis nach Kapitel 5.1 nicht erbracht wird, wird als Beispiel die Dauerstufe D = 360 min gewählt.

<u>Beispiel</u>: mit b_R = 1,2 m, h_R = 1,0 m, L_R = 18,5 m, k_f = 10^{-5} m/s, D = 360 min

$$V_{S,360} = [(1{,}2 + 1{,}0) \times 18{,}5 + 1{,}2 \times 1{,}0] \times 10^{-5} \times 360 \times 60 \times 1.000 = 9.050\ l$$

Für das gewählte Beispiel ergibt sich ein Volumen $V_{S,360}$ = 9.050 l. Dieses Volumen steht als weiterer Speicherraum zur Verfügung und kann für die Ermittlung des zulässigen Niederschlagvolumens N_{zul} dem im Kapitel 3.5 ermittelten Volumen der Haltung V_H aufgeschlagen werden.

$$N_{zul} = \left(\frac{V_H + V_{S,360}}{A_H}\right)\ [mm] \qquad (14)$$

<u>Beispiel analog zum Kapitel 5.1 (Ermittlung der zulässigen Niederschlagsmenge)</u>:

$$N_{zul} = \left(\frac{29.298 + 9.050}{530}\right) = 72{,}36\ mm$$

Für das gewählte Beispiel ergibt sich eine zulässige Niederschlagsmenge N_{zul} =72,36 mm (statt 55,28 mm ohne Berücksichtigung der Versickerungsleistung).

a) Bis zu einer Dauerstufe D ≤ 540 min (statt D ≤ 180 min) kann ein Niederschlagsereignis mit einer Wiederkehrzeit von T = 100 a zurückgehalten werden.

b) Bis zu einer Dauerstufe D ≤ 1440 min (1 Tag) (statt D ≤ 540 min) kann das System Niederschlagshöhen mit einer Wiederkehrzeit T ≥ 20 a aufnehmen, sodass auf eine Überflutungsüberprüfung vor Ort nach dem DWA-A 118 (in Wohngebieten) verzichtet werden könnte.

c) Für längere Dauerstufen D > 1 Tag ist theoretisch eine Überflutungsüberprüfung vor Ort nach dem DWA-A 118 (in Wohngebieten) erforderlich. Die für solch lange

Dauerstufen relevanten kleinen Regenspenden können aber i.d.R. schadlos über die Oberfläche (z. B. innerhalb des Straßenraums) abgeführt werden.

5.4 Zulässige angeschlossene Fläche (mit Versickerungsleistung)

Die Berechnung der Versickerungsrate sowie des Versickerungsvolumens erfolgt analog zum Kapitel 5.3 (Formeln (12) und (13)). Dieses Volumen steht als weiterer Speicherraum zur Verfügung und kann für die Ermittlung der zulässigen anzuschließenden Fläche V_{zul} dem im Kapitel 3.5 ermittelten Volumen der Haltung V_H aufgeschlagen werden.

$$A_{zul} = \frac{(V_H + V_{S,D})}{N(T;D)\ [mm]}\ [m^2] \qquad (15)$$

Beispiel analog zum Kapitel 5.2 (Ermittlung der maximal anschließbaren Fläche), Beispiel B:

$$A_{zul} = \left(\frac{V_H + V_{S,360}}{N_{20,360}}\right) = \frac{29.298 + 9.050}{47{,}8} = 802\ m^2$$

Es kann im Beispiel B eine Fläche von ca. A = 800 m² (statt 600 m² ohne Berücksichtigung der Versickerungsleistung) an eine Haltungslänge L = 20 m inklusive eines Baumstandortes angeschlossen werden.

Literaturverzeichnis

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (2015): DIN EN 1610:2015-12. Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (2024a): Arbeitsblatt DWA-A 118. Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Entwässerungssystemen.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (2024b): Arbeitsblatt DWA-A 138-1. Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser – Teil 1: Planung, Bau, Betrieb

Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (2010): Empfehlungen für Baumpflanzungen. Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate.

openko.de (2023): KOSTRA-DWD-2020. öffentlich zugängliche Tabelle basierend auf den Daten des KOSTRA-DWD-2020 Atlas. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter https://www.openko.de/, zuletzt geprüft am 06.05.2025.